



CONTROL SCIENCES

**Научно-технический
журнал**

6 номеров в год
ISSN 1819-3161

УЧРЕДИТЕЛЬ

Учреждение Российской
академии наук

Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор

Д.А. Новиков

**Заместители главного
редактора**

Л.П. Боровских, Ф.Ф. Пащенко

Редактор

Т.А. Гладкова

Выпускающий редактор

Л.В. Петракова

Издатель

ООО «СенСидат-Контрол»

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410.
Тел./факс (495) 334-92-00

E-mail: pu@ipu.ru

Интернет: <http://pu.mtas.ru>

Оригинал-макет
и электронная версия
подготовлены
ООО «Авансед Солюшнз»

Отпечатано в ИПУ РАН

Заказ № 80

Подписано в печать
8.06.2010 г.

Журнал зарегистрирован
в Министерстве Российской
Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации
ПИ №77-11963 от 06 марта 2002 г.

Журнал входит в Перечень ведущих
рецензируемых журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы
основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой
степени доктора и кандидата наук

Подписные индексы:
80508 и **81708** в каталоге Роспечати
38006 в объединенном каталоге
«Пресса России»

Цена свободная

© Учреждение Российской
академии наук
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

3.2010

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

Кулинич А.А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт:
подходы и методы. 2

Математические проблемы управления

Зак Ю.А. Решение обобщенной задачи Джонсона с ограничениями
на сроки выполнения отдельных заданий и времена работы машин.
Ч. 1. Точные методы решения. 17

Анализ и синтез систем управления

Гуляев С.В., Шубладзе А.М., Кузнецов С.И. и др. Нелинейные помехо-
защищенные дифференциаторы 26

Управление в социально-экономических системах

Коломеец А.А., Ключков В.В. Информационные системы как средство
обеспечения адаптивности фирмы в нестабильной среде. 30

Горошеникова Т.А., Цвиркун А.Д. Методы и инструментальные средства
оптимизации развития холдинговой компании 38

Масаев С.Н., Доррер М.Г. Оценка системы управления компанией
на основе метода адаптационной корреляции к внешней среде. 45

Управление сложными технологическими процессами и производствами

Резчиков А.Ф., Твердохлебов В.А. Причинно-следственные комплексы
взаимодействий в производственных процессах 51

Ершова О.В. Компьютерные тренажерные комплексы для повышения
эффективности управления процессами электротермического производства 60

Информационные технологии в управлении

Павлов П.А. Организация однородных конкурирующих процессов
при распределенной конвейерной обработке. 66

Управление подвижными объектами

Шубин А.Б., Александров Е.Г., Харченков Г.Г. Близкое к оптимальному
управление траекторией движения объекта 73

Хроника

Современные методы навигации и управления движением: модели и методы
обработки информации в задачах управления движением 79

* * *

Contents and abstracts. 83

* * *

Василий Николаевич Новосельцев (к 75-летию со дня рождения) 84

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОГНИТИВНЫХ КАРТ: ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ

А.А. Кулинич

Рассмотрены системы поддержки принятия решений в плохо определенных динамических ситуациях, основанные на моделировании экспертных знаний, представленных в виде когнитивных карт. На примере систем моделирования когнитивных карт, разработанных в России, дан обзор методов реализации основных функциональных подсистем систем поддержки принятия решений этого класса.

Ключевые слова: когнитивная карта, «мягкий» системный анализ, архитектура систем моделирования, параметризация, верификация, корректировка.

ВВЕДЕНИЕ

В процессах управления возникает необходимость принятия решений в слабо структурированных динамических ситуациях, когда параметры (значения переменных), законы и закономерности развития ситуации описываются качественно. Это уникальные ситуации, в которых динамика параметров ситуации сопровождается трудно предсказуемыми изменениями ее структуры.

Для принятия решений в условиях дефицита точной количественной информации эксперты и аналитики вынуждены опираться на собственный опыт и интуицию, используя для принятия решений в качестве модели динамической ситуации субъективную модель, основанную на экспертных оценках аналитиков, т. е. на их знаниях. Субъективную модель слабоструктурированной динамической ситуации называют когнитивной картой.

Деятельность экспертов и аналитиков, направленная на исследование ситуации и принятие решений с помощью когнитивных карт представляет собой методологию — логико-временную структуру [1] применения различных методов и приемов: построения когнитивной карты, ее параметризации, получение прогнозов развития ситуаций, верификации, корректировки когнитивной карты и принятие решений.

За последнее двадцатилетие в зарубежных научных журналах и в трудах международных конференций представлено большое число публикаций,

посвященных теоретическим исследованиям когнитивных карт и методам их анализа. Часто теоретические исследования сопровождаются примерами анализа когнитивных карт, подтверждающих обоснованность предлагаемых методов. При этом программное обеспечение, используемое для получения подтверждающих результатов, в научных статьях не описывается и не рассчитано на широкий круг пользователей. Многочисленные исследования когнитивных карт и методов их анализа заложили теоретический фундамент для создания прикладных коммерческих систем моделирования когнитивных карт и создали необходимые условия их появления. Достаточным условием появления таких систем является их востребованность конечными пользователями для решения актуальных проблем в условиях неопределенности.

Отметим, что состав методов анализа когнитивных карт, заложенных в программные системы, определяется характером актуальных проблем, для решения которых они создавались. Например, зарубежные системы моделирования когнитивных карт Decision Explorer (см. <http://www.banxia.com/dexplore/index.html>) и FCMapper (см. <http://www.fcappers.net/joomla/>) в большей степени ориентированы на анализ структуры когнитивных карт, а не на анализ динамики развития ситуаций, моделируемых когнитивными картами.

В России же, в условиях социально-экономических и политических преобразований, системы моделирования когнитивных карт в основном



ориентированы на анализ динамики развития ситуаций.

Российские научные коллективы, активно занимающиеся применением когнитивных карт для поддержки принятия решений и анализа ситуаций, создавали собственные программные продукты для автоматизации различных этапов процесса принятия решений. За последнее десятилетие в отечественной научной литературе был описан ряд компьютерных систем поддержки принятия решений в динамических ситуациях, основанных на моделировании когнитивных карт. Это системы, разработанные в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН: система моделирования знаковых и взвешенных орграфов [2], созданная коллективом под руководством В.В. Кульбы; система «Ситуация» [3], интегрированная система «КУРС» [4], включающая в себя системы «Ситуация», «Компас-2» и «КИТ», созданные коллективом под руководством В.И. Максимова и Н.А. Абрамовой; системы «Компас» [5] и «Канва» [6], созданные коллективом под руководством О.П. Кузнецова. Системы моделирования когнитивных карт разрабатывались и в различных регионах РФ: система когнитивного моделирования [7], созданная в научном коллективе Южного Федерального университета под руководством Г.В. Гореловой; система «ИГЛА» [8], Брянский государственный технический университет, разработчики Д.А. Коростелев и др.; система «Стратег» [9], Волгоградский государственный технический университет, разработчики М.А. Заболотский и др. Из систем, созданных за пределами РФ, упомянем систему «Космос» [10], разработанную компанией «Data C» (Украина, Севастополь) под руководством В.Б. Силова.

При таком многообразии систем моделирования когнитивных карт для принятия решений актуальным является их сравнительный анализ. В этой работе сравнительный анализ компьютерных систем моделирования когнитивных карт проводится с точки зрения их полезности для автоматизации различных этапов методологии (логико-временной структуры) принятия решений в слабоструктурированных динамических ситуациях.

Цель настоящей работы заключается в обзоре возможных методов и подходов реализации различных этапов методологии принятия решений в слабоструктурированных динамических ситуациях. Различное сочетание методов и подходов реализации этапов методологии принятия решений, в различных компьютерных системах, перечисленных выше, определяет границы их эффективного применения.

Часть из перечисленных систем позиционируются разработчиками как системы для лаборатор-

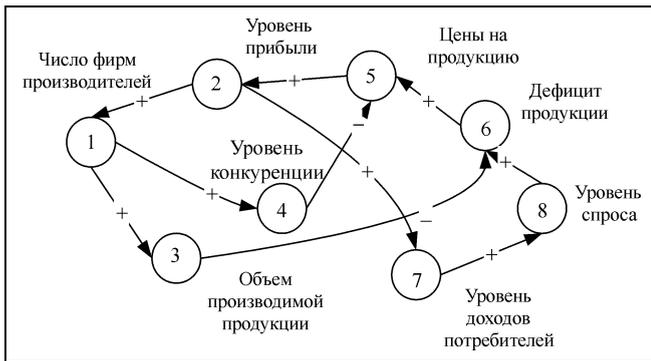
ного исследования проблемных ситуаций и поэтому не имеют ни подробного описания интерфейсов, ни описания математического аппарата, используемого для получения прогнозов развития ситуаций (в лучшем случае имеется ссылка на известный математический аппарат).

Поэтому для анализа компьютерных систем моделирования когнитивных карт выбран ряд систем («Ситуация» [3], «Компас» [5], «Канва» [6], «Космос» [10] и «ИГЛА» [8]), для которых математический аппарат, использованный в системах, достаточно подробно описан. Кроме этого, перечисленные системы позиционируются как коммерческие продукты. Это означает, что демоверсии этих систем могут быть интересны читателям для собственных исследований слабоструктурированных динамических ситуаций.

1. МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ СУБЪЕКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ (КОГНИТИВНЫХ КАРТ)

В общей теории систем [11] выделяются два направления ее развития: теории «жестких» и «мягких» систем. Теория «жестких» систем требует строгих количественных построений, основанных на дедуктивном методе. Для описания «жестких» систем используются строгие формализованные описания, а результаты моделирования объясняются строго доказанными причинными взаимосвязями. Формализация «мягких» систем основана не на точных количественных измерениях, а на качественных, нечетких и гипотетических представлениях о системе в виде экспертных оценок, эвристических рассуждений. В теории «мягких» систем рассматриваются системы, способные адаптироваться к внешним условиям, обладая при этом способностью к развитию. Это — биологические, психологические, социальные системы. Методы моделирования и анализа «жестких» систем не всегда приемлемы для анализа «мягких» систем. Методологической основой принятия решений в плохо определенной динамической ситуации принято считать методологию «мягкого» системного анализа [12].

Для анализа «мягких» систем П. Чекладом [13] была предложена методология «мягкого» системного анализа, представляющая собой системно ориентированное руководство, помогающее аналитику справиться с анализом сложной ситуации. Эта методология является системно организованным процессом исследования плохо определенной системы, включающем в себя ряд последовательно выполняемых этапов: структуризации проблемной ситуации; концептуализации, заключающейся в построении абстрактной модели наблюдае-



Пример когнитивной карты

мой системы; верификации абстрактной модели — сравнения абстрактной модели с реальным миром; корректировки абстрактной модели, и наконец, с помощью скорректированной модели, принятия решений по управлению ситуацией.

Задача поддержки принятия решений по управлению ситуацией в «мягкой» динамической ситуации определяется как задача разработки стратегии для перевода ситуации из текущего состояния в целевое состояние на основе субъективной модели ситуации, включающей в себя экспертно измеренные значения факторов ситуации и модель ее функциональной структуры, описывающей известные аналитику законы и закономерности наблюдаемой ситуации. Эта субъективная модель фиксируется в виде ориентированного знакового графа — когнитивной карты [14]. Пример когнитивной карты экономической ситуации показан на рисунке. Здесь вершины графа — это факторы ситуации, а дуги — причинно-следственные отношения между ними.

Знак плюс на дугах между вершинами-факторами означает, что увеличение значения фактора-причины приводит к увеличению фактора-следствия, а знак минус — увеличение значения фактора-причины уменьшает значение фактора-следствия. Когнитивная карта отражает функциональную структуру анализируемой ситуации, поскольку изменение значения любого фактора ситуации приводит к возникновению «фронта» изменений значений связанных с ним факторов. Этот «фронт» изменений называется импульсным процессом в когнитивной карте и позволяет получать прогнозы развития ситуации.

В рамках методологии «мягкого» системного анализа построение когнитивной карты представляет собой итерационный процесс генерации и проверки гипотез о функциональной структуре ситуации до получения структуры, способной прав-

доподобно объяснить динамику ее развития и включает в себя три основных этапа:

- построение гипотетической когнитивной карты (генерация гипотезы о функциональной структуре ситуации);
- верификация когнитивной карты (проверка правдоподобности гипотезы о функциональной структуре ситуации);
- корректировка когнитивной карты (функциональной структуры) ситуации.

Итерационный процесс «генерации, проверки, корректировки модели (генерации новой гипотезы)» повторяется до получения функциональной структуры, правдоподобно объясняющей поведение наблюдаемой ситуации. В процессе построения когнитивной карты используются интеллектуальные способности экспертов или аналитиков — их знания, которые структурируются в этом итерационном процессе.

С помощью обоснованной когнитивной карты решается задача выработки стратегии управления ситуацией, способной перевести ее из начального состояния в целевое. Причем обоснованность выработываемых стратегий определяется обоснованностью когнитивной карты, полученной в процессе ее генерации.

Таким образом, при принятии решений по управлению плохо определенной ситуацией, на основе моделирования когнитивных карт, знания и интеллект аналитика непосредственно участвуют в процессе принятия решений и в значительной степени определяют его качество. Можно говорить, что системы поддержки принятия решений в плохо определенных ситуациях дают положительные результаты только в тандеме с аналитическими способностями и творческим потенциалом аналитика.

Это обстоятельство предъявляет определенные требования к архитектуре компьютерной системы поддержки принятия решений на основе моделирования когнитивных карт, которые должны найти отражение в субъектно-ориентированной архитектуре системы.

2. КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Существует достаточно разнообразный инструментарий компьютерного имитационного моделирования в самых разных предметных областях и видах деятельности. В настоящее время на рынке программных продуктов насчитывается более 50 различных систем компьютерного имитационного моделирования [15]. Все они работают с числовыми данными, отражающими характеристики моделируемых систем, а имитационные модели



систем строятся в рамках концепции анализа «жестких» систем.

К компьютерным системам моделирования знаний, работающим в рамках концепции «мягкого» системного анализа, можно отнести экспертные системы, моделирующие знания и поведение экспертов при решении проблем, для решения которых накоплен значительный опыт принятия решений. Однако этот опыт трудно формализуем в рамках теории «жестких» систем.

Компьютерные системы моделирования когнитивных карт образуют особый класс систем имитационного моделирования, которые по функциональности и принципам организации можно позиционировать между системами имитационного моделирования и экспертными системами. В аспекте программной архитектуры системы моделирования когнитивных карт наследуют свойства систем имитационного моделирования «жестких» систем в плане организации процессов имитационного моделирования и экспертных систем в плане извлечения и представления экспертных знаний, а также их обработки. Все эти системы снабжены эргономичными удобными многооконными интерфейсами, но не поддерживают экспертную работу по разработке когнитивных карт. Автоматизируется в основном вычислительный прогноз развития ситуации. При этом результаты моделирования динамической системы с помощью когнитивных карт неточны, допускают множественные интерпретации. Неточность и качественный характер результатов моделирования в значительной степени определяются грубостью экспертных процедур, которые применяются для построения и настройки когнитивной карты, уровнем знаний, заблуждениями и ошибками аналитика или эксперта, строящего модель.

Методология «мягкого» системного анализа предполагает наличие экспертных ошибок и предусматривает избавление от них в рамках итерационного процесса «генерация — верификация — корректировка» когнитивной карты. Очевидно, что компьютерная система поддержки принятия решений, реализующая методологию «мягкого» системного анализа, позволит избавиться от множества экспертных ошибок и повысить качество принимаемых решений. Программная архитектура системы поддержки принятия решений, ориентированная на поддержку цикла «генерация — верификация — корректировка» когнитивной карты может считаться некоторым идеалом, относительно которого мы в дальнейшем будем анализировать перечисленные ранее программные системы моделирования когнитивных карт.

Идеализированная архитектура системы поддержки принятия решений на основе моделирова-

ния когнитивных карт должна включать в себя функциональные подсистемы, поддерживающие следующие этапы построения модели и принятия решений по управлению ситуацией: генерация — верификация — корректировки когнитивной карты и собственно принятие решений — разработка стратегии для перевода ситуации из текущего состояния в целевое. Рассмотрим содержание каждой функциональной подсистемы с точки зрения пользователя систем поддержки принятия решений, выбранных для анализа.

3. ГЕНЕРАЦИЯ ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ

На этом этапе выдвигается гипотеза о функциональной структуре ситуации на основе знаний, опыта субъекта — его интеллектуальных способностях, воображении и интуиции. Выдвижение гипотезы представляет собой экспертную процедуру выделения базовых (наиболее существенных) факторов ситуации. На множестве выделенных факторов ситуации экспертом выдвигаются гипотезы о существовании и силе причинно-следственного отношения между любой парой факторов ситуации. Результатом выполнения этого этапа является субъективная модель ситуации, представленная знакомым взвешенным ориентированным графом — когнитивной картой.

Генерация гипотетической когнитивной карты состоит из двух этапов:

- создание абстрактной когнитивной карты;
- ее параметризация.

Рассмотрим каждый из них.

3.1. Создание абстрактной когнитивной карты

Данный этап заключается в выделении множества факторов, описывающих ситуацию, и определении причинно-следственных отношений между ними. Это экспертная процедура, сильно зависящая от уровня знаний и предпочтений эксперта. Разные эксперты, наблюдая одну и ту же ситуацию, могут выделить разные значимые для них факторы и связи между ними, получая таким образом разные модели ситуации и, следовательно, разные стратегии управления ситуацией.

Снизить субъективизм этого этапа можно с помощью различных подходов и методик организации интеллектуальной деятельности в процессах структуризации плохо определенной ситуации, как-то: структурно-функциональный подход [16]; SWOT, PEST [17, 18], объектно-структурный подход [19] и др.

Методологической основой структуризации ситуации для представления ее в виде когнитивной

карты служит системный подход, в основе которого лежит рассмотрение объекта или ситуации как системы. Основными понятиями системного подхода служат понятия элемента, структуры, функции. В центре внимания системного подхода находится изучение структуры объекта или ситуации и места элементов в ней. Специфика системного подхода определяется тем, что он ориентирует исследование на раскрытие целостности объекта и обеспечивающих ее механизмов, на выявление многообразных типов связей сложного объекта и сведение их в единую теоретическую картину. Системный подход направлен на изучение целостности и установление состава целого и его элементов, исследование закономерностей соединения элементов в систему, т. е. структуры системы, изучение функций системы и ее составляющих, т. е. на структурно-функциональный анализ системы [16].

В последнее время в моделировании когнитивных карт применяются методы структуризации SWOT и PEST, известные из методологии стратегического менеджмента. В работах [17, 18] на этапах структуризации ситуации предлагается использовать модель ситуационного анализа SWOT (Strengths — сильные стороны, Weaknesses — слабые стороны, Opportunities — возможности, Threats — опасности, угрозы) для выявления сильных и слабых сторон ситуации (проблемных характеристик) и построения так называемого проблемного поля ситуации. Определение проблемного поля ситуации позволяет четко сформулировать цели и задачи моделирования когнитивных карт и поиска стратегии разрешения проблемной ситуации.

Для анализа внешнего окружения наблюдаемой ситуации в работе [18] предлагается использовать модель анализа внешней среды PEST (Policy — политика, Economy — экономика, Society — общество, Technology — технология). Согласно этой модели выделяются четыре основные группы факторов, посредством которых анализируется политический, экономический, социокультурный и технологический аспекты внешней среды вокруг исследуемого объекта.

Интерес представляет и методология структуризации знаний экспертов в виде так называемого поля знаний [19]. Здесь предложен объектно-структурный подход (ОСП) структуризации знаний, согласно которому анализ и представление знаний осуществляется в стратегическом, организационном, концептуальном, функциональном, пространственном, временном, каузальном и экономическом аспектах (стратах).

Применение перечисленных подходов позволяет несколько снизить субъективизм когнитивной

карты, но в любом случае когнитивные карты, построенные на ранних этапах анализа ситуации, характеризуются неполнотой и фрагментарностью, отражающей неполноту и фрагментарность знаний субъекта о ситуации.

Неполнота и фрагментарность выделенных факторов приводит к ошибкам, которые допускает эксперт на этапе определения причинно-следственных отношений между выделенными факторами. Характерные ошибки этого этапа: установление неочевидной связи, ошибки в определении знака влияния, установление транзитивных замыканий связей между факторами.

Перечисленные методы не включены в компьютерные системы поддержки принятия решений, предназначенных для моделирования когнитивных карт, а выбираются на основе личных предпочтений аналитика и выполняются вручную.

Интерфейсами ввода когнитивных карт в перечисленных системах служат либо графические редакторы, либо табличные формы, отражающие матрицу смежности когнитивной карты. Например, в системе «Канва» [6] графический редактор обеспечивает: построение и редактирование когнитивной карты (ориентированного знакового графа), отражающей функциональную структуру ситуации; ввод нового фактора; установку причинной связи между факторами; определение направления и типа связи (положительная, отрицательная); удаление фактора, удаление связи. С помощью графического редактора экспертным путем определяется когнитивная карта (F, W) , где F — множество вершин- факторов ситуации, $W = |w_{ij}|$ — матрица смежности ориентированного графа.

Для снижения субъективизма построения когнитивной карты в системе «ИГЛА» [8] предложен метод ее коллективного создания. Здесь когнитивную карту создают множество экспертов, представляя свои мнения о факторах и связях между ними на согласование координатору. Координатор согласовывает мнения разных экспертов и корректирует ее. Такой метод поддержан архитектурой «клиент — сервер», обеспечивающей независимую работу экспертов.

3.2. Параметризация когнитивной карты

В результате параметризации абстрактная когнитивная карта, построенная на предыдущем этапе, превращается в модель конкретной динамической системы. В процессе параметризации когнитивной карты определяются шкалы:

значений факторов и текущих значений факторов;

силы влияния фактора на фактор и их значений.



3.2.1. Определение шкал значений факторов и текущих значений факторов

При определении шкал факторов важно определить тип когнитивной карты, моделируемой конкретной компьютерной системой, т. е. определить, как интерпретируются значения факторов и силы связи между ними. В работе [20] рассмотрены две возможные интерпретации когнитивных карт — недетерминированные и детерминированные.

В *недетерминированных* когнитивных картах вес дуги и значения в вершинах интерпретируются как коэффициенты уверенности, характеризующие, соответственно, уверенность эксперта в существовании связи между факторами, и уверенность в том, что фактор, характеризующий некоторое событие, будет иметь место.

В *детерминированных* когнитивных картах, значение фактора в вершине интерпретируется как его абсолютное значение, выраженное в соответствующих единицах измерения (рубли, километры и др.) либо лингвистическими оценками («*Большой*», «*Средний*», «*Малый*»), при этом вес дуги интерпретируется как коэффициент передачи, связывающий изменение абсолютных значений факторов признака и причины.

По этому признаку системы «Космос» и «ИГЛА» следует отнести к системам, ориентированным на моделирование недетерминированных, а системы «Ситуация», «Компас», «Компас-2» и «Канва» — детерминированных когнитивных карт.

В моделировании когнитивных карт доминирует подход, направленный на исследование реакции системы на некоторое начальное возмущение (приращение) значений ее факторов.

Шкала уверенности. Шкалы приращений значений факторов для недетерминированных когнитивных карт характеризуют приращение показателя неопределенности (уверенности) значения фактора и представляются на числовых интервалах $[-1, 1]$. Интерпретация отрицательных значений показателя уверенности затруднительна и мало понятна для эксперта.

В работе [21] Б. Коско предложил решать эту проблему, дополняя любой фактор ситуации $f_i \in F$ фактором, имеющим противоположный смысл, т. е. \bar{f}_i . Этот подход удобен для описания систем, моделирующих разнополярные приращения значений факторов. Эксперт задает два показателя неопределенности: показатель неопределенности положительного приращения $p_i^+ \in [0, 1]$ для фактора f_i и показатель неопределенности его отрицательного приращения $p_i^- \in [0, 1]$. При таком определении приращения показателя неопреде-

ленности возможно представление неопределенности в так называемых «серых» шкалах [22], для которых не выполняется условие нормировки $p_i^+ + p_i^- = 1$. Считается, что «серые» шкалы лучше отражают экспертные оценки в условиях неопределенности. Конфликт оценок p_i^+ и p_i^- определяется с помощью показателя когнитивного консонанса $c_i = |p_i^+ - p_i^-| / (p_i^+ + p_i^-)$ [23].

Степени уверенности представляются в виде упорядоченного множества лингвистических значений уверенности $Z^p = \{\text{«Невозможно»}, \text{«Слабо возможно»}, \text{«Почти возможно»}, \text{«Возможно»}, \text{«Очень возможно»}, \text{«Почти достоверно»}, \text{«Достоверно»}\}$. Шкала уверенности представляется как отображение $\varphi: Z^p \rightarrow [0, 1]$ на отрезок числовой оси.

Экспертная процедура определения показателей неопределенности на интервале значений $[0, 1]$ для положительных и отрицательных приращений понятна эксперту и интерпретируется следующим образом: 0 как невозможное, а 1 как достоверное приращение.

Оценочные шкалы приращений значений факторов. Несколько более сложной и более субъективной является экспертная процедура определения шкал приращений факторов для детерминированных когнитивных карт.

В системах «Ситуация» и «Компас» считается, что эксперт, имея некоторое интуитивное представление о текущих значениях всех факторов, которые в реальности измеряются абсолютными числовыми значениями или же в оценочных лингвистических шкалах, может представить изменение значения факторов в терминах оценочной шкалы приращений значений факторов от текущего значения.

Примером такой шкалы может служить биполярная оценочная шкала приращений, представленная упорядоченным множеством лингвистических значений $Z = \{\text{«Сильно растет»}, \text{«Средне растет»}, \text{«Слабо растет»}, \text{«Не меняется»}, \text{«Слабо падает»}, \text{«Средне падает»}, \text{«Сильно падает»}\}$.

Оценочная шкала приращений значений факторов строится как отображение элементов множества Z на отрезок числовой оси $[-1, 1]$ в виде равноотстоящих точек, т. е. $\varphi: Z \rightarrow [-1, 1]$.

Оценочная шкала приращений обладает большим уровнем субъективизма, эксперт может допускать ошибки, поскольку эксперт явным образом не фиксирует текущее абсолютное значение фактора и плохо представляет различные оценки степени приращения значений факторов в абсолютной шкале.

Шкалы с «абсолютными» лингвистическими значениями. В системе «Канва» [6] для снижения субъективизма шкал факторов использована лингвистическая шкала с «абсолютными» лингвистическими значениями [24]. Здесь при определении лингвистических значений используются «абсолютные» лингвистические значения фактора, а не субъективные его оценки типа «Большой», «Средний», «Малый». Например, лингвистическим значением температуры может служить лингвистическое значение «так горячо, что едва можно приложить ладонь» или оценка «так холодно, что рука сразу замерзает» [24], а не просто «Очень горячо» или «Очень холодно». При таком определении лингвистических значений факторов ситуации экспертом задается «абсолютное» лингвистическое текущее значение фактора, что облегчает работу экспертов при определении силы влияния факторов и уменьшает экспертные ошибки.

Для фактора f_i определено упорядоченное множество лингвистических значений $Z_i = \{z_{i1}, \dots, z_{im}\}$. Причем для элементов множества лингвистических значений определен не только строгий порядок значений $z_{i1} < z_{i2} < \dots < z_{im}$, но и равенство интервалов между лингвистическими значениями. Равенство интервалов между значениями устанавливается с помощью экспертного метода деления отрезка пополам Торгерсона [25].

Шкала фактора определена как отображение каждого лингвистического значения фактора в точку числовой оси, $\varphi: Z_i \rightarrow X_i$, $X_i = \{x_{i1}, \dots, x_{im}\}$, $x_{i1}, \dots, x_{im} \in [0, 1]$.

Определено также и обратное отображение $\varphi^{-1}: x \rightarrow z_i$, $x \in [0, 1]$, позволяющее интерпретировать любое значение x в лингвистическое значение фактора z_i , $z_i \in Z_i$.

В терминах шкал факторов и приращений определено начальное состояние ситуации в лингвистическом виде $Z(0) = (z_{1k}, z_{2d}, \dots, z_{m})$ и, соответственно, в числовом $X(0) = (x_{1k}, x_{2d}, \dots, x_{m})$ как вектор начальных значений факторов. Определен также начальный вектор приращений факторов ситуации $P(0) = (p_1, p_2, \dots, p_n)$.

Приращение значения фактора определяется для текущего значения фактора и характеризуется направлением приращения — положительным, отрицательным приращением и значением приращения. Для заданного текущего состояния z_{ic} элементы множества $z_{i(c+1)}, z_{i(c+2)}, \dots, z_{in} \in Z_i$ будут характеризовать положительное приращение, а отрицательные приращения характеризуется элементами $z_{i(c-1)}, z_{i(c-2)}, \dots, z_{i1} \in Z_i$.

Текущему состоянию на интервале $[0, 1]$ соответствует точка x_{ic} . Положительные приращения определяются как интервалы (отрезки) числовой оси: $p_{i1}^+ = x_{i(c+1)} - x_{ic}$; $p_{i2}^+ = x_{i(c+2)} - x_{ic}$; ...; $p_{i(n-c)}^+ = x_{in} - x_{ic}$, а отрицательные приращения — это интервалы числовой оси: $p_{i1}^- = x_{ic} - x_{i(c-1)}$; $p_{i2}^- = x_{ic} - x_{i(c-2)}$; ...; $p_{ic}^- = x_{ic} - x_{i1}$.

Приращения факторов в системе «Канва», полученные при вычислении прогнозов развития ситуации вербализуются, т. е. представляются в виде утверждений вида: «Значение фактора f_i увеличилось (уменьшилось) от текущего значения $z_{ic} = \varphi^{-1}(x_{ic})$ до значения $z_{in} = \varphi^{-1}(x_{in})$ ». Такой подход позволяет снизить субъективизм экспертных оценок.

3.2.2. Шкалы силы влияния факторов

При определении силы влияния факторов эксперт определяет вес дуги, связывающей фактор причины и фактор следствия. Шкалы силы влияния для детерминированных и недетерминированных когнитивных карт по-разному интерпретируют значение веса дуги знакового орграфа.

Шкала силы влияния в недетерминированных когнитивных картах. В недетерминированных когнитивных картах вес дуги определяет уверенность в существовании связи между вершинами и представляется числом в интервале $[-1, 1]$. Специфика представления приращений в недетерминированных когнитивных картах в виде пары значений — положительного p_i^+ и отрицательного приращения p_i^- фактора приводит к следующему представлению связей факторов. Для причинно-следственной связи $w_{ij} \in [-1, 1]$ между фактором причины $f_i \in F$ и фактором следствия $f_j \in F$ положительная связь связывает положительные приращения с положительным, а отрицательное с отрицательным приращениями, т. е. $w_{ij}^+: p_i^+ \rightarrow p_j^+$, $w_{ij}^+: p_i^- \rightarrow p_j^-$. Отрицательная связь, соответственно, положительные приращения с отрицательными, а отрицательные с положительными приращениями, т. е. $w_{ij}^-: p_i^+ \rightarrow p_j^-$, $w_{ij}^-: p_i^- \rightarrow p_j^+$. Это приводит к удвоению размера матрицы смежности когнитивной карты, но при этом все элементы матрицы, определяющие показатель неопределенности существования связи положительны и определены на интервале $[0, 1]$.

Элементы двойной положительно определенно матрицы смежности $W' = |w'_{ij}|_{2n \times 2n}$ определя-



ются из матрицы смежности $W = |w_{ij}|_{n \times n}$ следующим образом [10]:

если $w_{ij} > 0$, то $w'_{(2i-1)(2j-1)} = w_{ij}$, $w'_{2i2j} = w_{ij}$;

если $w_{ij} < 0$, то $w'_{2i(2j-1)} = -w_{ij}$, $w'_{(2i-1)2j} = -w_{ij}$.

В этом случае степени уверенности в существовании связи представляются в виде упорядоченного множества лингвистических значений уверенностей $Z^{pw} = \{\text{«Невозможно»}, \text{«Слабо возможно»}, \text{«Почти возможно»}, \text{«Возможно»}, \text{«Очень возможно»}, \text{«Почти достоверно»}, \text{«Достоверно»}\}$. Шкала уверенности в существовании связи представляется как отображение $\varphi: Z^{pw} \rightarrow [0, 1]$.

Экспертная процедура определения показателей неопределенности связей факторов на интервале значений $[0, 1]$ понятна эксперту, поскольку 0 интерпретируется как невозможная, а 1 как достоверная связь.

Шкала силы влияния факторов в детерминированных когнитивных картах. Сложнее ситуация при определении весов связей в детерминированных когнитивных картах. Здесь вес связи определяет коэффициент передачи. Определяя этот коэффициент, эксперт должен ответить на вопрос: «Как влияет фактор f_i на фактор f_j и с какой силой?». В системах «Ситуация» и «Компас» ответ может быть выбран из упорядоченного множества лингвистических значений оценок силы влияния: $Z^W = \{\text{«Сильно увеличивает»}, \text{«Средне увеличивает»}, \text{«Слабо увеличивает»}, \text{«Не влияет»}, \text{«Слабо уменьшает»}, \text{«Средне уменьшает»}, \text{«Сильно уменьшает»}\}$.

Каждый элемент упорядоченного множества Z^W отображается на отрезок числовой оси $[-1, 1]$ в виде равноотстоящих точек, $\varphi: Z^W \rightarrow [-1, 1]$.

Такая шкала силы влияния факторов обладает высоким уровнем субъективизма. Дело в том, что когнитивные карты моделируют, как правило, нелинейные динамические системы, в которых сила влияния между факторами зависит от текущих значений факторов причины. Линейная когнитивная карта аппроксимирует участок нелинейной системы вблизи текущего значения фактора причины, и если текущее значение фактора при экспертном определении силы влияния определено неявно, то это приводит к существенным искажениям оценки силы влияния факторов при их экспертном определении.

В системах «Ситуация» и «Компас» значения весов дуг, определяющие интервал значений силы влияния ограничен интервалом $w_{ij} \in [-1, 1]$. Однако здесь вес интерпретирован как коэффициент передачи и поэтому его значения могут находиться за пределами обозначенного интервала. Многочис-

ленные примеры когнитивных карт, для которых $w_{ij} \notin [-1, 1]$, можно найти в работе Робертса [26].

Параметризация силы влияния факторов абстрактной когнитивной карты с помощью оценочных шкал факторов, в которых явным образом не определено текущее состояние фактора, обладает высоким уровнем субъективизма, приводит к множеству ошибок, вызванных некорректно поставленным вопросом эксперту.

Если когнитивная карта параметризована с помощью описанных оценочных шкал приращения и шкал силы влияния, то возникают трудности при ее верификации.

Косвенные методы определения силы влияния факторов. Для уменьшения субъективизма в определении силы влияния факторов в системе «Канва» применяются косвенные методы определения силы влияния. Эксперт определяет силу влияния, отвечая на вопросы о возможном изменении значения фактора следствия при фиксированном изменении фактора причины. Такая процедура позволяет определить силу влияния с учетом текущего состояния фактора причины, что уменьшает ошибку экспертного оценивания. Генерация вопросов эксперту для определения силы влияния между признаками автоматически осуществляется в двух режимах: прямого оценивания и парного сравнения.

В режиме прямого оценивания сила влияния определяется как коэффициент передачи, вычисляемый по заданным экспертом в лингвистическом виде приращениям фактора причины и фактора следствия. Приращения могут быть заданы точно или в виде нечеткого множества.

При точном задании значений приращений факторов эксперт отвечает на вопрос: «Оцените, как изменение значения фактора f_i от z_i^0 до z_i^p влияет на изменение значения признака-следствия f_s », определяя правдоподобное, с его точки зрения, «абсолютное» лингвистическое значение фактора причины z_s^r . Далее сила влияния определяется как коэффициент передачи

$$w_{is} = p_i^p / p_s^r, \quad (1)$$

где $p_i^p = (x_i^0 - x_i^p) / x_i^0$ — отклонение значения фактора-причины, а $p_s^r = (x_s^0 - x_s^r) / x_s^0$ — отклонение фактора-следствия, $x_i^0 = \varphi_i(z_i^0)$ и $x_s^0 = \varphi_s(z_s^0)$ начальные значения соответственно фактора-причины и фактора-следствия; $x_i^p = \varphi_i(z_i^p)$ и $x_s^r = \varphi_s(z_s^r)$ значения факторов после экспертного определе-

ния приращения их значений, z_i^0 и z_s^0 — начальные лингвистические значения факторов f_i и f_s , z_i^p и z_s^r — лингвистические значения факторов f_i и f_s после приращения, φ_i и φ_s — отображения лингвистических значений z_i^0 , z_s^0 , z_i^p и z_s^r факторов f_i и f_s на отрезок числовой оси $[0, 1]$.

Задание отклонений значений факторов причины или следствия в виде *нечеткого множества* используется в случаях, когда эксперт затрудняется точно определить отклонение фактора-следствия, вызванное отклонением фактора-причины. Функция принадлежности значения отклонения фактора-следствия представляется в треугольной или трапециевидальной форме и задается нечетким множеством:

$$\mu_{[0,1]}(x_s^r) = \{x_{s1}^r \setminus v_1, x_{s2}^r \setminus v_2, \dots, x_{sh}^r \setminus v_h\},$$

где $x_{s1}^r, \dots, x_{sh}^r$ — значения фактора после приращения, v_1, \dots, v_h — субъективные оценки возможности соответствующих приращений фактора-следствия при заданном приращении фактора-причины.

Значение отклонения фактора, заданного функцией принадлежности $\mu_{[0,1]}(x_s^r)$, определяется путем дефазификации функции принадлежности путем вычисления центра тяжести фигуры, образованной функцией принадлежности $\mu_{[0,1]}(x_s^r)$:

$$x_s^r = \sum_h x_{sh}^r v_h / \sum_h v_h.$$

После дефазификации сила влияния признаков w_{is} определяется с помощью соотношения (1).

Режим парного сравнения применяется в случаях, когда эксперту проще упорядочить факторы-причины из множества $F_i = \{f_p, f_s, \dots, f_z\}$ по силе влияния на фактор-следствие f_i . Факторы-причины упорядочиваются с помощью метода парного сравнения, смысл которого заключается в экспертном определении: изменение какого из двух факторов-причин, предложенных для оценки, сильнее влияет на изменение значения фактора-следствия. Эксперт определяет свои предпочтения, используя ранговую шкалу, предложенную Т. Саати [27]. Необходимое условие корректного упорядочивания факторов из множества F_i состоит в транзитивности оценок эксперта. Нарушение транзитивности считается противоречием в предпочтениях эксперта, которое необходимо обнаружить и исправить. Система «Канва» автоматически обнаруживает та-

кого рода противоречия и позволяет субъекту их исправить. Предусмотрено два режима корректировки противоречий эксперта: ручной и автоматизированный. В ручном режиме эксперт получает возможность переопределить свои предпочтения, заданные на предыдущем шаге парной оценки, а в автоматизированном режиме применяется эвристический алгоритм корректировки, позволяющий заменить нетранзитивную оценку на наиболее близкую транзитивную.

В системе «Канва» все интерфейсы настройки когнитивной карты оформлены в виде удобных интерфейсов, позволяющих снизить трудоемкость настройки когнитивной карты.

Применение «абсолютных» лингвистических шкал факторов и косвенных методов определения весов дуг позволяет снизить субъективизм настройки когнитивной карты. Снижение субъективизма связано в первую очередь с использованием в системе «Канва» автоматически сгенерированных вопросов эксперту на ограниченном естественном языке, в виде стандартных шаблонов вопросов. В вопросе для косвенного определения силы влияния факторов явным образом определено: «абсолютные» значения текущего состояния оцениваемых факторов причины и следствия; «абсолютные» значения оцениваемых отклонений значений факторов причины и следствия, определяющих силу влияния. Явное указание «абсолютных» значений и отклонений факторов в вопросе оценивания приводит к пониманию экспертом сути экспертной оценки определения силы влияния факторов, что снижает субъективизм оценки.

4. ВЕРИФИКАЦИЯ КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ

Верификации когнитивной карты (проверка гипотезы о функциональной структуре) заключается в получении на модели прогноза развития ситуации и его объяснении на основе имеющихся данных и здравого смысла. Моделирование ситуации позволяет выявить рассогласование между прогнозом развития ситуации, полученным с помощью когнитивной карты, и реальным развитием ситуации в прошлом. Выявленные рассогласования свидетельствуют об ошибочных представлениях аналитика о законах и закономерностях развития ситуации, заложенных в субъективную модель, и служат стимулами эксперту или аналитику для поиска новой или корректировки текущей функциональной структуры наблюдаемой системы.

На этапе верификации когнитивной карты эксперт пытается понять: насколько верна построенная им когнитивная карта, и можно ли с ее по-



мощью вырабатывать решения по управлению ситуацией?

Будем рассматривать два подхода выполнения верификации когнитивной карты: прямая и обратная верификация. Обратная верификация основана на установлении правдоподобности прогнозов развития ситуации, полученных с помощью когнитивной карты путем сравнения их с известной динамикой ситуации в прошлом. Прямая верификация основана на анализе правдоподобности процессов, приводящих к изменению значений факторов в прогнозе.

Верификация когнитивной карты основана на анализе прогнозов развития ситуации, которые в разных системах [2—10] различны. Поэтому рассмотрим методы получения прогнозов в разных системах.

4.1. Методы получения прогнозов развития ситуации

Общая постановка задачи получения прогнозов развития ситуации следующая.

Задано множество факторов ситуации F , определены шкалы факторов (см. п. 3.2) и когнитивная карта задана матрицей смежности W ориентированного графа. Пусть факторы ситуации характеризуются некоторым начальным значением, представленным в виде вектора начального состояния $X(0) = (x_1(0), \dots, x_n(0))$. Эксперт может увеличить или уменьшить начальные значения любых факторов $X(1) = (x_1(1), \dots, x_n(1))$. Приращение значения фактора $p_i(0) = x_i(1) - x_i(0)$ называется начальным импульсом, а вектор приращений $P(0) = (p_1(0), \dots, p_n(0))$ — начальным вектором приращений. Требуется получить прогноз развития ситуации.

Для получения прогноза развития ситуации в моделировании когнитивных карт записывается система конечно-разностных уравнений вида

$$P(t+1) = WP(t), \quad (2)$$

где $P(t)$ и $P(t+1)$ — векторы приращений значений факторов в моменты времени t и $t+1$ (векторы импульсов).

Состояние ситуации в момент времени $t+1$ определяется из соотношения $X(t+1) = X(t) + P(t+1)$, где $X(t)$ — состояние ситуации в момент времени t .

Совокупность векторов приращений $P(t)$, $P(t+1)$, ..., $P(t+n)$ в последовательные дискретные моменты времени называется импульсным процессом [26], а состояния ситуации $X(t)$, $X(t+1)$, ..., $X(t+n)$ характеризуют динамику ее изменения при управляющих воздействиях $P(t)$.

4.1.1. Метод получения прогноза развития ситуации при моделировании недетерминированных когнитивных карт

В системах «Космос» и «ИГЛА» применяется метод получения прогнозов, основанный на теории нечетких множеств. Для вычисления прогнозных значений факторов ситуации используется правило max-product — (умножение и взятие максимума) и двойная положительно определенная матрица смежности $W' = |w'_{ij}|_{2n \times 2n}$ [10].

Прогноз развития ситуации определяется с помощью матричного уравнения:

$$P'(n) = P'(0) \circ W'^*, \quad (3)$$

где \circ — правило max-product: $p'_i(n) = \max_j (p'_j(0) w'_{ij})$, $p'_i(n) \in P'(n)$, $p'_i(0) \in P'(0)$, $w'_{ij} \in W'^*$, W'^* — транзитивное замыкание матрицы смежности когнитивной карты.

В начальном $P(0)$ и прогнозном $P(n)$ векторах приращений размерностью $2n$ ($p_1^-, p_1^+, \dots, p_n^-, p_n^+$), значение фактора f_i характеризуют два элемента: элемент с индексом $2i$ характеризуют положительное p_i^+ , а с индексом $2i-1$ — отрицательное p_i^- приращения фактора. Это позволяет моделировать когнитивный консонанс в представлениях субъекта о значении фактора [23] и характеризовать уверенность субъекта в результатах моделирования. Степень когнитивного консонанса $c_i(t)$ определяется из соотношения:

$$c_i(n) = \frac{|p_i^+(n) - p_i^-(n)|}{p_i^+(n) + p_i^-(n)}, \quad 0 \leq c_i(n) \leq 1. \quad (4)$$

При $c_i(n) \approx 1$, т. е. $p_i^+(n) \gg p_i^-(n)$ или $p_i^-(n) \gg p_i^+(n)$ уверенность субъекта в приращении фактора $p_i(n)$ максимальна, а при $c_i(n) \approx 0$, т. е. $p_i^+(n) \approx p_i^-(n)$, минимальна.

Транзитивное замыкание положительно определенной когнитивной карты определяется из соотношения: $W'^* = \bigvee_{k=1}^{\infty} (W')^k$.

С учетом когнитивного консонанса значения фактора компонента $p_i(n) \in P(n)$ вектора прогноза развития ситуации представляется парой $(p_i(n), c_i(n))$, где $p_i(n) = \text{sign}(p_i^+(n) - p_i^-(n)) \max(p_i^+(n), p_i^-(n))$ — значение приращения фактора, $c_i(n)$ — консонанс значения фактора.

Знак приращения $p_i(n)$ положителен, если $p_i^+(n) > p_i^-(n)$, и отрицателен, если $p_i^+(n) < p_i^-(n)$.

В этом случае, прогнозное состояние ситуации будем определять парой

$$(X(n), C(n)), \quad (5)$$

где $X(n) = X(0) + P(n)$ — вектор состояния ситуации (его компонента $x_i(n) = x_i(0) + p_i(n)$), когнитивный консонанс значения $c_i(n) \in C(n)$.

Из матрицы транзитивного замыкания $W^{*} = [w_{ij}]_{2n \times 2n}$ получают матрицы [10] $C_S = [c_{ij}]_{n \times n}$ — взаимного консонанса, $D_S = [d_{ij}]_{n \times n}$ — взаимного диссонанса, $d_{ij} = 1 - c_{ij}, \forall ij, P_S = [p_{ij}]_{n \times n}$ — взаимного положительного влияния, $N_S = [n_{ij}]_{n \times n}$ — взаимного отрицательного влияния.

4.1.2. Метод получения прогноза развития ситуации при моделировании детерминированных когнитивных карт

В рассматриваемых системах моделирования детерминированных когнитивных карт используются два разных метода получения прогноза развития ситуации — с суммированием и без суммирования приращений значений факторов.

А. Метод получения прогноза развития ситуации с суммированием приращений значений факторов применен в системе «Ситуация». Эта модель была предложена в работе Робертса [26], затем анализировалась и модифицировалась в работах [28, 29]. Для вычисления компонентов $p_i(t + 1)$ вектора прогнозных приращений $P(t + 1)$ в уравнении (2) используется соотношение:

$$p_i(t + 1) = \sum_j w_{ij} p_j(t).$$

Прогноз развития ситуации представляется в виде вектора значений всех факторов $(x_1(n), \dots, x_n(n))$,

где $x_i(n) = x_i(0) + \sum_{t=0}^n p_i(t)$, $x_i(0) \in [0, 1]$ — начальное состояние моделируемой ситуации.

Поскольку в этом методе текущие значения факторов задаются абстрактно, (без привязки к конкретным значениям факторов), то можно считать начальное состояние всех факторов нулевым $x_i(0) = 0, i = 1, \dots, n$, и прогнозный вектор значений

всех факторов $x_i(n) = \sum_{t=0}^n p_i(t)$ определяется накопленными приращениями значений факторов за n тактов работы моделирующего комплекса.

В этом случае компоненты вектора прогноза $x_i(n) \in [-1, 1]$ могут быть представлены в лингвистических оценочных шкалах приращения.

В. Метод получения прогноза развития ситуации без суммирования приращений применяется в системах «Компас» и «Канва».

Метод получения прогноза развития ситуации в системе «Компас» отличается от метода прогноза систем «Космос» и «ИГЛА» детерминированной интерпретацией когнитивной карты.

Для вычисления компонентов $p_i(n)$ вектора прогнозных приращений $P(n)$ в уравнении (2) используется соотношение:

$$p_i(n) = \max_j w_{ij} p_j(0).$$

В системе «Компас», моделирующей детерминированные когнитивные карты, для определения значений факторов используются оценочные шкалы приращений, без фиксации текущего значения факторов, т. е. $X(0) = 0$. Прогнозы развития ситуации представляются парой $(X(n), C(n))$, где значение $X(n) = P(n)$ получается с помощью соотношения (3), а консонанс $C(n)$ значений вычисляется по соотношению (4).

Компоненты $p_i(n) \in P(n)$ вектора прогноза определены на интервале $[-1, 1]$ и могут быть представлены в терминах оценочной шкалы приращений «Сильно растет», ..., «Сильно падает».

Система «Канва» также ориентирована на моделирование детерминированных когнитивных карт. В ней применяется метод вычисления прогнозов систем «Космос» и «ИГЛА» в детерминированной интерпретации когнитивных карт. В отличие от системы «Компас», в системе «Канва» используются «абсолютные» лингвистические шкалы, поэтому здесь явным образом определяется начальное состояние ситуации как вектор значений всех факторов ситуации в лингвистическом $Z(0) = (z_1^0, \dots, z_n^0)$ и числовом виде $X(0) = (x_1^0, \dots, x_n^0)$, а также начальный вектор приращений факторов $P(t) = (p_1, \dots, p_m)$.

Прогноз развития ситуации также определен парой $(X(n), C(n))$, где $X(n) = X(0) + P(n)$ получаются с помощью соотношений (3) и (5) консонанс $C(n)$ значений — с помощью соотношения (4).

Прогноз развития $X(n)$ ситуации в системе «Канва» вербализуется с помощью обратных отображений шкал $\varphi^{-1}: X(n) \rightarrow Z(n)$ и представляется пользователю в «абсолютных» лингвистических значениях.

4.2. Обратная верификация когнитивной карты

Прогнозы, полученные с помощью одного из описанных методов, служат основой процесса верификации когнитивной карты. Обратная вери-



фикация когнитивной карты основана на анализе правдоподобности прогнозов развития ситуации и представляется как экспертная процедура сравнения полученных прогнозных значений факторов с известными значениями факторов в прошлом, полученными при начальных условиях прошлого. Корректность такой процедуры верификации зависит от ряда объективных сложностей формализации плохо определенной динамической ситуации и, соответственно, упрощений, сделанных на этапе построения когнитивной карты.

Выделим два основных упрощения.

- Моделируются плохо определенные нелинейные динамические системы, в которых параметры связей между факторами (вес дуг) зависят от текущего состояния системы $W(X(t))$. Динамика изменения состояния такой системы определяется как отображение $W(X(t)): X(t) \rightarrow X(t+1)$ текущего состояния $X(t)$ в будущее $X(t+1)$. Когнитивные карты аппроксимируют нелинейную динамическую систему линейной в ε -окрестностях текущего состояния $X(0)$, считая веса на дугах неизменными $W(X(0)) = \text{const}$. Динамика изменения состояния ситуации определяется в этом случае из соотношения $W(X(0)): X(t) \rightarrow X(t+1)$, $t = 0, \dots, n$.
- Динамика развития процессов в модели ситуации, представленной когнитивной картой, протекает в дискретном модельном времени, не учитывающим задержки распространения влияний между факторами, существующие в реальной моделируемой системе.

Из-за первого упрощения верификация линейных когнитивных карт на основе сравнения прогнозов развития ситуации с динамикой развития нелинейной ситуации в прошлом может быть и бесполезной из-за нелинейности самой ситуации. Из-за второго упрощения короткие циклы, существующие в когнитивной карте, при условии накопления приращений значений факторов могут сильно исказить прогноз значения факторов. Кроме этого, модельный прогноз отражает установившиеся значения факторов, но утверждать об установившихся значениях факторов реальной ситуации в момент ее наблюдения и выполнения ее верификации затруднительно.

Поэтому определение близости прогнозных значений и реальных значений параметров динамической ситуации оказывается некорректным. Действительно, реальное развитие ситуации обычно точно фиксируется в абсолютных значениях или относительных приращениях этих значений (например, в процентах), и их сравнение с прогнозными значениями, представленными с помощью интуитивно полученных шкал оценок прираще-

ний не позволяет говорить ни о строгости такого сравнения, ни о доверии к результатам такого сравнения.

В этом случае верификация осуществляется путем анализа тенденций прогнозов развития ситуации путем определения их правдоподобности. Правдоподобность прогнозов проверяется сравнением тенденций изменения значений факторов в прогнозе, полученных с помощью когнитивной карты, и известной динамикой (тенденций) развития ситуации в прошлом. Тенденция развития ситуации в прогнозе и реальное развитие ситуации в прошлом в этом случае формализуется направлением изменения значений факторов, выбираемым, например, из множества лингвистических значений тенденций: {«Растет», «Не меняется», «Падает»} без указания степени роста или падения значений факторов.

Если для выполнения такого сравнения используются прогнозы, полученные в оценочных шкалах приращений («Сильно растет», ..., «Сильно падает»), полученные с интуитивным представлением о текущих значениях факторов, то сложность и некорректность самого процесса верификации прогнозов развития ситуации сильно возрастает.

Снизить субъективизм этого этапа, сократив экспертные ошибки, можно в системах моделирования, в которых параметризация когнитивной карты выполнена с помощью лингвистических шкал с «абсолютными» лингвистическими значениями, а в качестве модели прогноза используется метод без суммирования приращений. Прогнозы развития ситуации, получаемые с помощью когнитивных карт, представляются в «абсолютных» шкалах приращений, т. е. указывается точное текущее значение и возможный рост или падение значения фактора в прогнозе в лингвистическом виде с указанием уверенности, что такое изменение произойдет. Поскольку отсутствует суммирование приращений, то прогноз значения факторов считается нижней гарантированной границей прогноза.

При использовании лингвистических шкал с «абсолютными» лингвистическими значениями прогноз развития ситуации можно представить виде относительных изменений, с указанием уверенности их изменения (консонанса). Такое представление прогноз значения облегчает его сравнение с реальными изменениями значений факторов ситуации, представленных абсолютными значениями или относительными изменениями.

Компьютерная поддержка процесса верификации во всех системах, рассматриваемых в данной статье, осуществляется экспертным путем на основе графической визуализации прогнозов разви-

тия ситуации и их вербализации в оценочных шкалах приращения или в шкалах с «абсолютными» лингвистическими значениями.

4.3. Прямая верификация когнитивной карты

При прямой верификации правдоподобность прогноза проверяется методами, отличными от метода, которым он был получен. Прямая верификация когнитивной карты основана на анализе правдоподобности процессов в ситуации и тесно связана с анализом структуры когнитивной карты. Действительно, структура когнитивной карты определяет процессы, изменяющие значения факторов в прогнозах. При анализе структуры когнитивной карты важны «структурные картины» взаимодействия факторов. Один из нестрогих критериев правдоподобности структуры когнитивной карты рассматривался в работах Идена [30]. Он считает, что простая и понятная субъекту структура когнитивной карты, позволяющая объяснить процессы, происходящие в действительности, правдоподобна. Это простая и понятная структура в психологии называется гештальт-образом [31] наблюдаемой ситуации, представленной когнитивной картой. К сожалению, формализовать гештальт-образ когнитивной карты, из-за его субъективности, достаточно трудно и поэтому использовать его в качестве объективного критерия для верификации когнитивной карты на основе анализа правдоподобности процессов невозможно. Все это приводит к тому, что процесс верификации когнитивных карт на основе анализа процессов достаточно субъективный, содержит множество ошибок и заблуждений, связанных с индивидуальными особенностями экспертов и особенностями параметризации когнитивной карты.

В работах [32—34] предложен подход к верификации когнитивных карт, основанный на анализе типичных систематических ошибок, совершаемых их разработчиками. Выявлены два вида рисков, приводящие к ошибкам в когнитивных картах:

- риск ложной транзитивности, связанный с представлением в когнитивной карте в качестве факторов понятий разного уровня общности (ложная транзитивность возникает при установлении причинно-следственного отношения между понятиями (факторами) разного уровня общности);
- риск недопонимания математического смысла связей, что приводит к искажению содержательного смысла связей когнитивной карты относительно их математической интерпретации и, соответственно, к ошибкам в определении силы связей.

Риски первого из перечисленных видов предлагается снижать, применяя критерий соразмернос-

ти факторов по объемам понятий, позволяющий обнаружить несоразмерные по объемам понятия и понизить уровень общности путем расщепления вершин когнитивной карты на понятия более низкого уровня. Риски второго вида предлагается обнаруживать с помощью критерия понятности математического смысла конструкций карты по вербальному шаблону и снижать их, применяя для определения силы связи определенные шаблоны.

Еще один метод прямой верификации когнитивных карт предполагает применение так называемых подсистем «как-объяснения» [35] прогнозов развития ситуации. В системах моделирования когнитивных карт «Космос», «Компас» и «Канва» поддержка процесса верификации структуры когнитивной карты осуществляется с помощью встроенных подсистем объяснения прогнозов развития ситуации. Подсистемы объяснения прогнозов развития ситуации в когнитивных картах описывают последовательность процессов получения прогнозных значений факторов в виде цепочки сработавших в вершинах когнитивной карты правил. Объясняющие цепочки описывают процессы, изменяющие прогноз значения факторов, вербализуя их и облегчая таким образом понимание процессов в когнитивной карте и, соответственно, верификацию ее структуры.

В системе «Канва» блок объяснения прогноза развития ситуации обеспечивает автоматическую генерацию отчета, включающего в себя описание последовательных шагов (причинно-следственных цепочек) получения прогноз значения любого фактора ситуации. Отчет содержит положительную и отрицательную причинно-следственные цепочки. Положительная цепочка объясняет причину увеличения значения признака, а отрицательная — причину его уменьшения. В системе «Канва» предложен метод нахождения объяснений прогнозов развития ситуации, основанный на анализе матрицы прогноза развития ситуации [36]. Предложенный метод позволяет получать объяснения прогнозов развития ситуации в больших когнитивных картах.

Опираясь на подсистемы объяснений, пользователь экспертным путем определяет правдоподобность процессов, описанных в модели ситуации, и таким образом определяет правдоподобность когнитивной карты.

5. КОРРЕКТИРОВКА КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ

Корректировка когнитивной карты заключается в ее изменении на основе результатов выполнения этапа верификации. В процессе корректировки могут быть изменены шкалы факторов, силы



связи факторов, удалены или добавлены новые факторы и причинно-следственные связи. Процесс корректировки субъективен, опирается на интуицию и воображение аналитиков или экспертов, создающих когнитивную карту.

Поскольку когнитивная карта — это, как правило, сильно связанный ориентированный граф, и любая дуга оказывается включенной во множество процессов, определяющих прогнозные значения множества факторов ситуации, то удаление (добавление), изменение знака или веса влияния может полностью изменить прежний прогноз развития ситуации. Компьютерные системы поддержки корректировки когнитивной карты автору этой работы неизвестны. Однако существует ряд теоретических разработок методов поддержки процессов корректировки когнитивной карты.

Наиболее известный метод основан на анализе так называемой структурной устойчивости когнитивных карт [26]. Когнитивная карта (орграф) представляется в виде обобщенной знаковой «розы», связывающей ее устойчивость со структурой. Анализ обобщенной «розы» позволяет найти изменения структуры карты, позволяющие добиться ее устойчивости [26]. Этот метод не дает однозначных решений и ориентирован на стимуляцию интеллектуальной деятельности аналитика по поиску возможных изменений орграфа. Причем формально получаемые структурные решения требуют субъективной интерпретации в предметной области, в которой была построена когнитивная карта и не всегда возможны. Метод позволяет скорректировать когнитивную карту, т. е. выявить те ошибки эксперта, которые привели к ее неустойчивости, а также найти структурные решения, т. е. решения, направленные на изменение структуры карты в целях обеспечения ее устойчивости.

В работе [37] предложен метод поиска структурных решений, основанный на представлении альтернатив управления ситуацией в модели кластерной понятийной системы предметной области. Поиск структурного решения основан вначале на поиске класса допустимых интерпретаций, а затем на поиске структурного решения (изменений структуры), попадающего в этот класс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены системы моделирования когнитивных карт, разработанные в России. Подробно рассмотрены и проанализированы методы и подходы представления когнитивной карты в разных системах, вопросы ее параметризации и корректировки.

Автор стремился показать архитектурные особенности разных систем моделирования когнитивных карт, определяющие области применения и характерные задачи, решаемые с их помощью.

При выборе системы моделирования плохо определенной ситуации аналитику приходится решать компромиссную задачу, выбирая между точностью, адекватностью (правдоподобностью) модели ситуации и временем и трудоемкостью ее создания.

Системы «Ситуация», «Компас», «Космос» и «ИГЛА» обеспечивают небольшие время и трудоемкость создания моделей сложных предметных областей. Это связано с тем, что в системах используются одинаковые стандартные оценочные шкалы приращений для всех факторов и сил влияния факторов. Как было показано в данной статье, за малые трудоемкость и время приходится расплачиваться точностью, адекватностью (правдоподобностью) модели. С помощью этих систем целесообразно создавать абстрактные модели, не привязанные к конкретному состоянию моделируемой ситуации. Естественно, что результаты моделирования абстрактных моделей будут абстрактно выражены в терминах оценочных шкал.

Время и трудоемкость создания моделей ситуации в системе «Канва», несмотря на хорошие интерфейсы и поддержку пользователя, больше чем в упомянутых системах. Здесь для каждого фактора создаются шкалы с «абсолютными» лингвистическими значениями, кроме этого, индивидуально, по косвенным характеристикам, настраивается вес связи. Однако такая дополнительная экспертная работа позволяет снизить субъективизм когнитивной карты, превратить ее из абстрактной модели ситуации в модель, отражающую особенности текущего момента ее развития.

Прогнозы развития ситуации, полученные в системе «Канва», легче верифицируются, поскольку представлены в терминах «абсолютных» лингвистических значений, что облегчает аналитическую работу. Данную систему целесообразно применять в ситуациях поддержки принятия решений, когда важен учет текущего состояния ситуации.

Рассмотренные системы могут применяться для концептуального анализа и моделирования сложных и плохо определенных политических, экономических или социальных ситуаций, разработки стратегий управления и механизмов их реализации, разработки программных документов стратегического развития страны, региона, предприятия, фирмы и т. д., а также в качестве инструментария для непрерывного мониторинга состояния ситуации, порождения и проверки гипотез механизмов развития и механизмов управления ситуацией.

Применение систем моделирования когнитивных карт значительно расширяет горизонты аналитических возможностей экспертов, освобождая их интеллект от рутинной работы, стимулирует воображение и интуицию для генерации оригинальных решений и находок управления в запутанной ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. — М.: СИНТЕГ, 2007. — 668 с.
2. Методы формирования сценариев развития социально-экономических систем / В.В. Кульба, Д.А. Кононов, С.А. Косяченко, А.Н. Шубин. — М.: СИНТЕГ, 2004. — 296 с.
3. Максимов В.И., Григорян А.К., Корноушенко Е.К. Программный комплекс «Ситуация» для моделирования и решения слабоформализованных проблем. Междунар. конф. по проблемам управления. Москва, ИПУ РАН, 29 июня — 2 июля 1999 г. — М., 1999. — Т. 2. — С. 58—65.
4. Авдеева З.К., Максимов В.И., Рабинович В.М. Интегрированная система «КУРС» для когнитивного управления развитием ситуаций // Тр. ИПУ РАН. — М., 2001. — Т. XIV. — С. 89—114.
5. Кулинич А.А., Максимов В.И. Система концептуального моделирования социально-политических ситуаций «Компас» // Сб. докл. «Современные технологии управления». Науч.-практ. семинар «Современные технологии управления для администрации городов и регионов». — М., 1998. — С. 115—123.
6. Кулинич А.А. Когнитивная система поддержки принятия решений «Канва» // Программные продукты и системы. — 2002. — № 3. — С. 25—28.
7. Горелова Г.В., Радченко С.А. Программная система когнитивного моделирования социотехнических систем // Изв. ТРТУ. Тем. вып. «Актуальные проблемы экономики, менеджмента и права». — Таганрог, 2004. — № 4 (39). — С. 218—227.
8. Коростелев Д.А., Лагерев Д.Г., Подвесовский А.Г. Система поддержки принятия решений на основе нечетких когнитивных моделей «ИГЛА» // Одиннадцатая нац. конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ—2008, г. Дубна, 28 сентября — 3 октября 2008 г. — М., 2008. — Т. 3. — С. 327—329.
9. Заболотский М.А., Полякова И.А., Тихонин А.В. Применение когнитивного моделирования в управлении качеством подготовки специалистов // Управление большими системами. — 2007. — № 16. — С. 91—98.
10. Силев В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. — М.: ИНПРО-РЕС, 1995. — 228 с.
11. Дж. Ван Гиг. Общая прикладная теория систем. — М.: Мир, 1981.
12. Плотинский Ю.М. Модели социальных процессов. — М.: Логос, 2001. — 296 с.
13. Checkland P.B. Systems Thinking, Systems Practice. — New York: Wiley, 1981.
14. Axelrod R. The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites. — Princeton: University Press, 1976.
15. Swain J.J. Simulation Software Boldly Goes ..., // OR/MS Today. — 2007. — Vol. 36, N 5. — P. 50—61.
16. Парсонс Т. Система современных обществ — М.: Аспект Пресс, 1997. — 270 с.
17. Давыдов С.В., Максимов В.И. Технология выбора проблемных полей из окна возможностей в SWOT-анализе // Материалы 1-й междунар. конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций». — Москва, ИПУ РАН, октябрь 2001 г. — М., 2001. — С. 161—172.
18. Коврига С.В., Максимов В.И. Когнитивная технология стратегического управления развитием сложных социально-экономических объектов в нестабильной внешней среде // Там же. — С. 104—160.
19. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. — СПб.: Питер, 2000. — 384 с.
20. Кулинич А.А. Систематизация когнитивных карт и методов их анализа // Тр. VII междунар. конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуации (CASC'2007)», Москва, ИПУ РАН. — М., 2007. — С. 50—57.
21. Kosko B. Fuzzy cognitive maps // Man-Machine Studies. — 1986. Vol. 24. — P. 65—75.
22. Нечеткие гибридные системы. Теория и практика / Под ред. Н.Г. Ярушкиной. — М.: Физматлит, 2007. — 208 с.
23. Фестингер Л. Теория когнитивного диссонанса. — СПб.: Ювента, 1999. — С. 15—52.
24. Ларичев О.И., Мошкевич Е.М. Качественные методы принятия решений. — М.: Наука, 1996. — 208 с.
25. Torgerson W.S. Theory and Methods of scaling. — New York, 1958.
26. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. — М.: Наука, 1986.
27. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
28. Корноушенко Е.К., Максимов В.И. Управление ситуацией с использованием структурных свойств ее когнитивной карты // Тр. ИПУ РАН. — М., 2000. — Т. XI. — С. 85—90.
29. Максимов В.И. Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 30—38.
30. Eden C. Cognitive mapping // European Journal of Operational Research. — 1988. — N 36. — P. 1—13.
31. Вертгеймер М. Продуктивное мышление. — М.: Прогресс, 1987. — С. 336.
32. Абрамова Н.А., Коврига С.В. О рисках, связанных с ошибками экспертов и аналитиков // Проблемы управления. — 2006. — № 6. — С. 60—67.
33. Абрамова Н.А., Коврига С.В. Некоторые критерии достоверности моделей на основе когнитивных карт // Проблемы управления. — 2008. — № 6. — С. 23—33.
34. Коврига С.В. Верификация конкретных моделей на основе когнитивных карт / Тр. междунар. конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций» (CASC'2009), Москва, ИПУ РАН, 17—19 ноября 2009 г. — М., 2009. — С. 47—54.
35. Поспелов Д.А. Десять «горячих точек» в исследованиях по искусственному интеллекту. Интеллектуальные системы. — 1996. — Т. 1, вып. 1—4. — С. 47—56.
36. Кулинич А.А. Верификация качественных динамических моделей. Вторая междунар. конф. «Системный анализ и информационные технологии» САИТ—2007. Обнинск, 10—14 сентября 2007 г. — М., 2007. — Т. 1. — С. 35—38.
37. Кулинич А.А. Моделирование динамических процессов в понятийной системе субъекта для генерации креативных решений // Когнитивные исследования: Сб. науч. тр. — М., 2006. — Вып. 1. — С. 94—122.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О.П. Кузнецовым.

Кулинич Александр Алексеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎(495) 334-76-39, ✉kulinich@ipu.ru.

РЕШЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ ЗАДАЧИ ДЖОНСОНА С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА СРОКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ И ВРЕМЕНА РАБОТЫ МАШИН. Ч. 1. Точные методы решения

Ю.А. Зак

Задача поиска оптимальной перестановки, определяющей последовательность выполнения некоторого множества заданий в условиях фиксированной и одинаковой для всех заданий последовательности выполнения отдельных работ на различных машинах, обобщена на случай, когда заданы ограничения на стартовые и завершающие сроки как выполнения отдельных заданий, так и на времена работы оборудования. Исследованы свойства допустимых и оптимальных последовательностей выполнения заданий. Приведены расчетные формулы для вычисления нижней границы суммарной длины расписания. Разработаны точные и приближенные методы решения задачи.

Ключевые слова: оптимальное расписание, последовательность выполнения заданий, ограничения на времена начала и завершения.

ВВЕДЕНИЕ

Классическая задача теории расписаний, сформулированная Джонсоном («flow-shop problem») [1, 2], заключается в построении оптимальной последовательности выполнения комплекса заданий, а также в определении начальных и завершающих сроков выполнения всех работ (операций), входящих в каждое из этих заданий, обеспечивающих минимальное время завершения всего комплекса работ. Существенная особенность заключается в том, что состав и последовательности комплексов работ на рабочих станциях (машинах) для каждого из заданий одинаковы. Оптимальное решение ищется в подмножестве расписаний, для которого последовательность выполнения всего комплекса работ для всех рабочих станций (машин) одинакова.

Большинство рассматриваемых в литературе приближенных методов решения задачи в традиционной формулировке [1–4] не позволяют оценить точность полученного приближенного решения даже в случае, когда не заданы ограничения на конечные сроки выполнения отдельных заданий.

Эффективные формулы вычисления нижних границ оптимального решения позволили бы останавливать процесс решения при получении последовательности выполнения заданий с суммарной длительностью, удовлетворяющей поставленным требованиям точности.

Для конструирования алгоритмов получения точного решения задачи на основе метода «ветвей и границ» («branch-and-bound-method» [5–9]) должны быть получены эффективные оценки оптимального решения и для случаев, когда построена подпоследовательность выполнения только некоторого подмножества заданий, а остальные еще неупорядоченные задания должны продолжить эту последовательность.

Для практических приложений представляет существенный интерес рассмотрение обобщенной задачи Джонсона в условиях, когда заданы ограничения на начальные и конечные сроки выполнения заданий и использования рабочих станций. В такой постановке сформулированная задача имеет много приложений в планировании производства и организации обслуживания объектов. Исследованиям математических свойств таких задач не уделялось должного внимания в литературе. За-

частую очень сложно на начальных этапах решения установить факт несовместности исходной системы ограничений, что, как правило, также сопряжено со значительным объемом вычислений.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На m рабочих станциях (машинах) должно быть выполнено n заданий, каждое из которых состоит из фиксированного и одного и того же для каждого задания числа операций. Последовательность выполнения операций каждого задания строго задана и одинакова для всех заданий. Каждая из m операций задания выполняется на некоторой конкретной рабочей станции и не допускает разрывов во времени выполнения. Следовательно, пара индексов (i, k) , $i = 1, \dots, n$; $k = 1, \dots, m$ однозначно идентифицируют каждую операцию любого задания.

Заданы:

$\Pi = \{1, \dots, k, \dots, m\}$ — последовательность выполнения операций, одинаковая для каждого задания;

$t(i, k)$ — время выполнения операции (i, k) ;

b_i и B_i — соответственно граничные сроки на начало и завершение выполнения i -го задания;

h_k и H_k — соответственно граничные начальные и конечные времена возможности использования k -й рабочей станции.

Если величины b_i или h_k не заданы, то они полагаются равными нулю. В случае отсутствия граничных значений B_i или H_k они полагаются равными ∞ .

Все граничные значения и времена выполнения операций предполагаются целочисленными величинами.

Обозначим:

$x(i, k)$ — время начала выполнения операции (i, k) ;

$\theta(i, k)$ — допустимый наиболее ранний срок начала выполнения операции (i, k) ;

$\sigma(i, k) = x(i, k) + t(i, k)$ — время завершения выполнения операции (i, k) ;

$T_i = \sigma(i, m)$ — время завершения выполнения операции i -го задания,

$T = \max_{1 \leq i \leq m} T_i$ — время окончания выполнения всего множества заданий.

Необходимо найти оптимальную последовательность выполнения заданий и определяемые ею целочисленные значения времен начала и окончания выполнения всех операций, обеспечивающие соблюдение всех ограничений на допустимые сроки выполнения всех заданий и времена работы рабочих станций, которая минимизирует время выполнения всего комплекса работ T .

На основе исследования и анализа свойств, допустимых и оптимальных последовательностей выполнения заданий предлагаются как формулы, так и алгоритмы, требующие незначительных объемов вычислений, для оценки совместности системы ограничений и минимальной длительности расписания в условиях, когда построена последовательность выполнения некоторого подмножества заданий (некоторый частичный план). В процессе развития частичного плана (с увеличением длины последовательности, т. е. числа заданий, включенных в нее) эти оценки становятся все более точными и при построении полной последовательности совпадают с решением. На основе предложенных оценок уже на этапе предварительного анализа и на каждом из шагов алгоритма происходит эффективный отсев подмножеств, не содержащих допустимых расписаний. Во многих случаях, когда система ограничений является несовместной, определяются номера рабочих станций, ресурс времени которых должен быть раздвинут и альтернативные номера заданий, начальные и конечные сроки выполнения которых должны быть скорректированы.

Рассматриваются методы решения задачи, в которых оптимальная последовательность заданий строится последовательно и вначале состоит только из одного задания, выполняемого первым. Затем эта последовательность расширяется включением некоторого задания, которое выполняется вторым и т. д.

Частичным планом P^s назовем некоторую упорядоченную подпоследовательность выполнения подмножества I_1^s , включающего в себя R^s заданий, — $J^s = \{i_1^s, i_2^s, \dots, i_R^s\}$, в которой определены допустимые сроки начала и окончания выполнения каждой операции всех входящих в эту последовательность заданий. В частичном плане первым выполняется задание i_1^s , затем задание i_2^s и последним — задание i_R^s . Множество различных последовательностей выполнения остальных заданий расписания $I_2^s = I/I_1^s$, которое необходимо определить, назовем дополнением этого частичного плана и обозначим его D^s . Для каждого частичного плана могут быть определены нижние границы суммарной длительности расписания, оценки возможности выполнения системы ограничений на начальные и конечные сроки выполнения заданий и на времена работы оборудования. В подмножестве дополняющих планов могут быть исключены подмножества последовательностей, не содержащих допустимых решений.



2. ОЦЕНКА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ДЛИНЫ РАСПИСАНИЯ

Рассмотрим вначале оценку минимальной длины расписания в традиционной постановке flow-shop problem без учета ограничений на начальные и конечные сроки выполнения заданий и возможности использования машин. Ясно, что общая продолжительность расписания не может быть меньше длительности выполнения каждого из заданий

$$E^0 = F \geq \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{k=1}^m t(i, k).$$

Для начала работы каждой k -й рабочей системы необходимо, чтобы все операции $l = 1, \dots, k - 1$, предшествующие этой k -й операции, были уже выполнены. Для этого в i -м задании требуется времени не менее чем $\eta_1(i, k) = \sum_{l=1}^{k-1} t(i, l)$ даже в том

случае, если при выполнении этого задания ни одна из рабочих станций не теряет времени на простой после выполнения предыдущей операции. Суммарное время выполнения всех операций

на k -й машине равно $\sum_{i=1}^n t(i, k)$. После того, как

операции всех заданий на k -й рабочей станции будут выполнены, еще требуется дополнительное время работы машин, $l = k + 1, \dots, m$, равное

$\eta_2(i, k) = \sum_{l=k+1}^m t(i, l)$, для того чтобы завершить выполнение i -го задания. Следовательно, оценка времени выполнения расписания из условия занятости рабочих систем определяется выражением

$$E^0 = F \geq \max_{1 \leq k \leq m} \left\{ \sum_{i=1}^n t(i, k) + \min_{1 \leq i \leq n} \eta_1(i, k) + \min_{1 \leq i \leq n} \eta_2(i, k) \right\},$$

а с учетом оценки завершения выполнения отдельных заданий — выражением

$$E^0 = F \geq \max \left[\max_{1 \leq k \leq m} \left\{ \sum_{i=1}^n t(i, k) + \min_{1 \leq i \leq n} \eta_1(i, k) + \min_{1 \leq i \leq n} \eta_2(i, k) \right\}, \sum_{k=1}^n \max_{1 \leq i \leq n} t(i, k) \right]. \quad (1)$$

Выражение для нижней границы длины расписания в виде (1) известно и широко применяется в литературе (см., например, работы [1, 2, 10]). Однако оно не годится при наличии ограничений на сроки выполнения заданий и времена работы оборудования, а также в случаях, когда необходимо оценить эффективность отдельных частичных планов.

Для вычисления нижней границы оптимальной длины расписания в условиях ограничений рассмотрим расчетные формулы вычисления сроков начала и завершения выполнения операций заданий некоторого частичного плана P^s , которые упорядочены в последовательности $P^s = \{i_1^s, i_2^s, \dots, i_{l-1}^s, i_l^s, \dots, i_R^s\}$:

$\theta(i_1^s, 1) = \max[h_1, b(i_1^s)],$
 $\sigma(i_1^s, 1) = \theta(i_1^s, 1) + t(i_1^s, 1) - 1,$ (2)

$$\theta(i_1^s, k) = \max[h_k, \sigma(i_1^s, k - 1) + 1],$$

$$\sigma(i_1^s, k) = \theta(i_1^s, k) + t(i_1^s, k) - 1, \quad k = 2, \dots, m, \quad (3)$$

$$\theta(i_l^s, k) = \max[\sigma(i_l^s, k), \sigma(i_l^s, k - 1)] + 1,$$

$$\sigma(i_l^s, k) = \theta(i_l^s, k) + t(i_l^s, k) - 1, \quad (4)$$

$$k = 1, \dots, m, \quad l = i_2^s, \dots, i_R^s.$$

В формуле (4) полагается $\sigma(i_l^s, k - 1) = 0$ при $k = 0$.

Определим следующие величины:

— время выполнения рабочей системой k всего подмножества заданий I_2^s

$$\tau^s(k) = \sum_{i \in I_2^s} t(i, k), \quad k = 1, \dots, m; \quad (5)$$

— наиболее ранние сроки начала выполнения подмножества заданий I_2^s на каждой k -й рабочей системе

$$\mu^s(i, 0) = 0, \quad \mu^s(i, 1) = \sigma(i_R^s, 1) + 1, \quad (6)$$

$$\mu^s(i, k) = \max[\sigma(i_R^s, k) + 1, \mu^s(i, k - 1) + t(i, k - 1)],$$

$$k = 2, \dots, m, \quad i \in I_2^s; \quad (7)$$

— наиболее ранний срок завершения выполнения всех операций каждого из заданий $i \in I_2^s$ после окончания работы k -й рабочей системы

$$g^s(i, k) = \sum_{j=k+1}^m t(i, j), \quad k = 1, \dots, m, \quad i \in I_2^s; \quad (8)$$

— наиболее ранний срок завершения выполнения каждого задания $i \in I_2^s$

$$\lambda^s(i, m) = \mu^s(i, m) + t(i, m) - 1, \quad i \in I_2^s, \quad (9)$$

или более точная оценка

$$\lambda^s(i, m) = \max_{0 \leq k \leq m-1} \left[\mu^s(i, m-k) + \sum_{r=0}^k t(i, m-r) - 1 \right]. \quad (10)$$

Утверждение 1. Продолжительность выполнения всего комплекса работ для частичного плана не может быть меньше величины

$$F^s = \max \left\{ \max_{i \in I_2^s} \lambda^s(i, m); \max_{1 \leq k \leq m} \left[\min_{i \in I_2^s} \mu^s(i, k) + \min_{i \in I_2^s} g(i, k) + \sum_{i \in I_2^s} t(i, k) - 1 \right] \right\}. \quad (11)$$

Для начального частичного плана P^0 ($I_1^s = \emptyset$, $I_2^s = I$) выражение (10) имеет вид

$$F^0 = \max \left\{ \max_{1 \leq i \leq n} \sigma^0(i, m); \max_{1 \leq k \leq m} \left[\min_{1 \leq i \leq n} \sigma^0(i, k) + \min_{i \in I} \sum_{l=k+1}^m t(i, l) + \sum_{i \in I} t(i, k) - 1 \right] \right\}. \quad (12)$$

Выражение (12), в котором значения $\sigma^0(i, k)$ и $\sigma^0(i, m)$ вычисляются по формулам (2) и (3), эквивалентно выражению (1).

3. ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАННОЙ СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕНИЙ ФОРМУЛИРУЕМОЙ ЗАДАЧИ И ПОСТРОЕННЫХ ЧАСТИЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ВЫПОЛНЕНИЯ МНОЖЕСТВА ЗАДАНИЙ

Далее исследуются свойства допустимых частичных последовательностей выполнения заданий. Это позволит уже на первых шагах алгоритма исключить из рассмотрения подмножество последовательностей выполнения заданий, не содержащих допустимых планов, а также на начальном этапе решения установить факт несовместности системы ограничений исходной задачи.

Утверждение 2. Если для частичного плана P^s существует хотя бы одно задание $i \in I_2^s$, для которого справедливы условия

$$\lambda^s(i, m) > B_i, \quad (13)$$

то он не содержит допустимых последовательностей и может быть исключен из рассмотрения. ♦

Утверждение 3. Если для частичного плана P^s существует хотя бы одна рабочая система $k = 1, \dots, m$, для которой справедливы условия

$$\max_{i \in I_2^s} \mu^s(i, k) + \sum_{i \in I_2^s} t(i, k) - 1 > H_k, \quad (14)$$

он не содержит допустимых последовательностей и может быть исключен из рассмотрения. ♦

Утверждение 4. Если для некоторого частичного плана P^s справедливо неравенство

$$\max_{i \in I_2^s} B_i < F^s, \quad (15)$$

то он не содержит допустимых решений. ♦

Ясно, что для частичного плана P^s время завершения выполнения любого из заданий $i \in I_2^s$ не может быть меньше времени $\delta^s(i, m) = \sigma^s(i_R^s, m) + t(i, m) - 1$ или (более точная оценка)

$$\delta^s(i, m) = \max_{0 \leq k \leq m-1} \left[\sigma^s(i_R^s, m-k) + \sum_{r=0}^k t(i, m-r) - 1 \right].$$

Упорядочим все задания подмножества I_2^s по возрастанию граничных значений времени завершения их выполнения B_i :

$$B_{j_1} \leq B_{j_2} \leq \dots \leq B_{j_g} \leq \dots \leq B_{j_G} \quad (16)$$

и определим значения

$$\begin{aligned} \delta^s(j_1, m) &= \mu^s(j_1, m); \\ \delta^s(j_g, m) &= \mu^s(j_{g-1}, m) + t(j_g, m) - 1, \\ &g = 2, \dots, G. \end{aligned} \quad (17)$$

Более точные оценки могут быть получены из формул

$$\begin{aligned} \delta^s(j_0, k) &= \sigma^s(i_R, k), \quad \delta^s(j_g, k) = \\ &= \max[\delta^s(j_{g-1}, k), \delta^s(j_g, k-1) + \\ &+ t(j_g, k-1) - 1], \end{aligned} \quad (18)$$

$$k = 1, \dots, m, \quad g = 1, \dots, G.$$

Утверждение 5. Если на этапе анализа некоторого частичного плана P^s в процессе вычисления значений $\delta^s(j_g, m)$ согласно последовательности (16) обнаружится справедливость хотя бы одного из неравенств

$$\delta^s(j_g, m) > B_{j_g}, \quad g = 1, \dots, G, \quad (19)$$



то он не содержит допустимых последовательностей и может быть исключен из рассмотрения. ♦

Сформулируем очевидные условия несовместности системы ограничений на сроки выполнения заданий и возможностей использования рабочих систем обобщенной flow-shop problem.

Утверждение 6. Пусть исходное множество заданий I упорядочено в порядке возрастания граничных значений окончания выполнения отдельных заданий $B_{i_1} \leq B_{i_2} \leq \dots \leq B_{i_g} \leq \dots \leq B_{i_n}$ и согласно формулам (2) и (3) определены наиболее ранние возможные сроки начала и завершения всех операций каждого задания $\theta^0(i, k)$, $\sigma^0(i, k)$, $k = 1, \dots, m$; $i = 1, \dots, n$; согласно выражению (1) вычислена нижняя граница общей длительности завершения выполнения всех заданий F^0 . Если для вычисленных граничных значений справедливо хотя бы одно из следующих неравенств на сроки завершения выполнения отдельных операций или заданий:

$$\sigma^0(i, m) > B_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (20)$$

$$\sigma_{\min}^0 + \sum_{l=2}^g t(i_l, m) - 1 > B_{i_g}, \quad g = 2, \dots, n, \quad (21)$$

где $\sigma_{\min}^0 = \min_{i \in I} \{\sigma^0(i, m) : B_i \neq \infty\}$,

$$\min_{1 \leq i \leq n} \theta^0(i, k) + \sum_{i=1}^n t(i, k) - 1 > H_k, \quad k = 1, \dots, m, \quad (22)$$

$$F^0 > \max_{1 \leq i \leq n} B_i, \quad (23)$$

то исходная система ограничений задачи несовместна. ♦

Утверждение 6 позволяет уже на начальном этапе решения установить факт несовместности сформулированной системы ограничений, определить индексы заданий и рабочих систем, являющихся «узким местом» и граничный временной ресурс которых должен быть расширен.

4. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В основе алгоритмов точного решения задачи лежит метод ветвей и границ. Впервые подобный эффективный алгоритм был предложен в работе [5]. Дальнейшее развитие алгоритмов данного класса нашло отражение в работах [6, 7, 11–13] и др. Во всех алгоритмах при вычислении границ и выборе переменной для ветвления используются модифицированные времена выполнения заданий на двух машинах и алгоритмы Джонсона. При огра-

ничениях на сроки выполнения заданий и времена работы машин данные алгоритмы не позволяют эффективно отсеивать не содержащие допустимые расписания вариантов. Описываемые далее подходы лишены указанных недостатков.

4.1. Параметры частичных планов

Каждый развиваемый частичный план P^s , определяемый подпоследовательностью выполнения некоторых R^s заданий и включаемый в дерево решений задачи, характеризуется следующими признаками:

P_0^s — номер плана в дереве решений;

$P_1^s, \dots, P_i^s, \dots, P_n^s$ — информация о состоянии

выполняемых заданий, $i = 1, \dots, n$. Если P_i^s равно некоторому положительному числу r , где $1 \leq r \leq n$, то это определяет, что i -е задание стоит на r -м месте в подпоследовательности J^s . Если $P_i^s = 0$, то место этого задания в последовательности еще не определено и должно быть выбрано. Если $P_i^s = -1$, то установка i -го задания на $(R^s + 1)$ -е место последовательности в данном частичном плане недопустима либо в дереве решений уже существует продолжение частичного плана P^s , в котором это задание стоит на этом $(R^s + 1)$ -м месте;

$P_{n+1}^s, \dots, P_{n+i}^s, \dots, P_{2n}^s$ — значения оценки длины расписания, если i -е задание будет установлено в этой последовательности на $(R^s + 1)$ -м месте — $(F^s|i)$. Для всех заданий, у которых $P_i^s \neq 0$, $P_{n+i}^s = \infty$;

$P_{2n+1}^s, \dots, P_{2n+k}^s, \dots, P_{2n+m}^s$ — времена завершения операций на соответствующих машинах для последнего R^s -го задания, стоящего в подпоследовательности J^s данного частичного плана;

$P_{2n+m+1}^s = \min_{1 \leq i \leq n} P_{n+i}^s$ — нижняя оценка критерия оптимальности для данного частичного плана;

P_{2n+m+2}^s — признак возможности и целесообразности продолжения данного частичного плана.

Если $P_{2n+m+1}^s = \infty$ и все значения признаков P_i^s , $i = 1, \dots, n$, отличны от нуля, то $P_{2n+m+2}^s = -1$, и данный частичный план уже продолжен во все перспективные направления и больше (либо вообще) не содержит допустимых расписаний. В противном случае $P_{2n+m+2}^s = 0$, и еще не рассмотрены все возможные допустимые продолжения.

4.2. Преобразование параметров при продолжении частичного плана P^s добавлением в подпоследовательность J^s некоторого j -го задания

Пусть на некотором шаге алгоритма построено N частичных планов. При продолжении частичного плана P^s назначением на последнее $(R^s + 1)$ -е место в подпоследовательности J^s некоторого задания $j \in I_2^s$ признаки вновь образованного частичного плана P^q определяются следующим образом:

$$P_0^q = N + 1,$$

$$P_j^q = R^s + 1,$$

если $1 \leq P_i^s \leq n$ и $i \neq j$; $P_i^q = 0$ во всех остальных случаях, $i = 1, \dots, n$;

$$P_{n+i}^q = P_{n+j}^s,$$

если $P_i^q = 0$, и $P_{n+i}^q = \infty$ в противном случае, $i = 1, \dots, n$;

$$P_{2n+k}^q = \sigma^q(j, k) = \max[P_{2n+k}^s, P_{2n+k-1}^q + t(j, k-1)] + t(j, k) - 1, \quad k = 1, \dots, m. \quad (24)$$

В формуле (24) предполагается $P_{2n}^q = 0$.

$$P_{2n+m+1}^q = P_{n+j}^s; \quad P_{2n+m+2}^q = 0,$$

если существуют признаки $P_i^q = 0$;

$$P_{2n+m+1}^q = \infty, \quad P_i^q = -1 \text{ в противном случае.}$$

Число членов во вновь образованной подпоследовательности J^q равно $R^q = R^s + 1$. Параметры P_j^s и P_{n+j}^s частичного плана P^s полагаем равными $P_j^s = -1$, $P_{n+j}^s = \infty$. Корректируем также параметр $P_{2n+m+1}^s = \min_{1 \leq i \leq n} P_{n+i}^s$. Если $P_{2n+m+1}^s = \infty$ и все P_i^s отличны от нуля, то полагаем $P_{2n+m+2}^s = -1$.

После выполнения данных преобразований число частичных планов N также увеличивается на единицу.

4.3. Выбор задания, включаемого последним в подпоследовательность (ветвление)

Для каждого из заданий подмножества $j \in I_2^s$, у которых $P_j^s = 0$, выполняем следующие вычисления.

Рассчитываем сроки завершения выполнения задания по формулам

$$\sigma^s(j, k|J^s) = \max[\sigma^s(j, k-1|J^s) + t(j, k-1); P_{2n+k}^s] + t(j, k) - 1.$$

Полагаем $I_2^s = I_2^s/j$, $\delta^s(i, m) = \sigma^s(j, m|J^s)$ и проверяем возможность выполнения системы ограничений задачи в соответствии с системой неравенств (13)—(19). Если справедливы условия хотя бы одного из утверждений 1—4, то назначение в P^s -м частичном плане задания j на $(R^s + 1)$ -е место в последовательности недопустимо. Полагаем $P_j^s = -1$ и $P_{n+j}^s = \infty$. Если не выполняется ни одно из неравенств системы (13)—(19), то вычисляем оценку длины расписания при условиях, что на $(R^s + 1)$ -м месте в последовательности J^s стоит задание j по формулам (11). Рассчитанное значение $(F^s|j)$ присваиваем параметру $P_{n+j}^s = (F^s|j)$.

Находим

$$P_{n+w}^s = \min\{P_{n+j}^s; j \in I_1^s, P_j^s = 0\}. \quad (25)$$

Соответствующий номер задания $j = w$ определяет уточненную нижнюю границу критерия оптимальности для частичного плана P^s ($P_{2n+m+1}^s = P_{n+w}^s$) и выбирается при продолжении данного частичного плана (см. п. 4.2).

4.4. Алгоритмы получения точных и приближенных решений задачи

Алгоритмы решения основываются на последовательном развитии некоторого допустимого и перспективного частичного плана P^s и назначении некоторого задания $j \in I_2^s$ на $(R^s + 1)$ -е место, т. е. после всех заданий данной подпоследовательности J^s . На каждом шаге алгоритма выбирается некоторый допустимый план с эффективной (минимальной или наилучшей среди некоторого подмножества частичных планов) оценкой. В этом плане в соответствии с выражением (25) определяется наиболее перспективное задание, которое целесообразно поставить на данное место в последовательности, проверяются возможности выполнения всей системы ограничений, связанные с данным назначением, исключаются продолжения, не содержащие допустимых расписаний, и уточняется оценка длины кратчайшего расписания, связанного с этим назначением.

Каждый частичный план представляется в виде вершины дерева анализируемых вариантов. Корнем этого дерева служит начальный частичный план P^0 , у которого $I_1^0 = J^0 = \emptyset$, $I_2^0 = I$. Для на-



частичного плана P^0 по формулам (2)—(4) рассчитываются значения $\theta^0(i, k)$ и $\sigma^0(i, k)$, а также согласно выражениям (5)—(10) значения $\tau^0(k)$, $\mu^0(i, k)$, $g^0(i, k)$ и $\lambda^0(i, k)$. Нижняя граница длины допустимого расписания выполнения всех заданий F^0 рассчитывается в соответствии с формулой (12). Затем оценивается совместность исходной системы ограничений задачи в соответствии с выражениями (20)—(23). Если выполняется хотя бы одно из неравенств утверждения 6, то система ограничений задачи несовместима, и алгоритм с соответствующим сообщением заканчивает работу. В противном случае построенный начальный план является корнем дерева решений задачи. Первый полученный допустимый частичный план, у которого $I_1^s = I$, является допустимым расписанием выполнения заданий. Номер этого плана и значение его оценки (показатель P_{2n+m+1}^s) запоминается как «рекорд», т. е. наилучшее из полученных допустимых решений. При получении следующего допустимого расписания со значением критерия оптимальности лучшим, чем в прежних допустимых решениях, производится замена «рекорда». Если получено значение «рекорда» не хуже, чем значение оценки длины оптимального расписания (показатель P_{2n+m+1}^s) у любого из частичных планов, то рассчитанный «рекорд» является решением задачи и алгоритм заканчивает работу.

Если на какой-то итерации алгоритма еще не получено допустимых расписаний и во всех частичных планах значение показателя $P_{2n+m+2}^s = -1$, то не существует допустимых расписаний, и алгоритм с соответствующим сообщением заканчивает свою работу.

Далее следует формальное описание алгоритма. Обозначим: N — число построенных частичных планов, E — длина расписания наилучшего из полученных допустимых решений.

4.4.1. Алгоритм А

Данный алгоритм состоит из отдельных шагов, которые в некоторой логической последовательности выполняются на каждой из итераций.

Шаг 0 (предварительный). Полагаем $N = 0$, $E = \infty$. Определяем начальный частичный план P^0 , у которого $I_1^0 = J^0 = \emptyset$, $I_2^0 = I$. Вычисляем оценку длины допустимого расписания F^0 по формуле (12) и оцениваем допустимость этого частичного плана в соответствии с условиями утверждения 6. Если в результате вычислений будет установлено, что система ограничений задачи несовместима, то алгоритм с соответствующим сообщением заканчивает работу. В противном случае по-

казатели метки плана P^0 определяются следующим образом:

$$P_1^0 = 0; \quad P_i^0 = 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad P_{n+i}^0 = F^0, \quad i = 1, \dots, n; \\ P_{2n+k}^0 = 0, \quad k = 1, \dots, m; \quad P_{2n+k+1}^0 = F^0; \quad P_{2n+k+2}^0 = 0.$$

Выбираем частичный план P^0 и переходим к шагу 1.

Шаг 1. Для выбранного частичного плана P^s выбираем задание $j = w$, включаемое в последовательность в соответствии с алгоритмом, описанным в п. 4.3. Если такого допустимого задания не существует, то полагаем $P_{2n+k+1}^s = \infty$, $P_{2n+k+2}^s = -1$ и переходим к шагу 4. В противном случае — к шагу 2.

Шаг 2. Образует новый частичный план P^q и выполняем преобразование параметров при продолжении частичного плана P^s добавлением в подпоследовательность J^s некоторого j -го задания ($j = w$) в соответствии с алгоритмом, описанным в разделе 5.2. Если во вновь построенном частичном плане P^q все показатели $P_i^q = b_i$, где $1 \leq b_i \leq n$, $i = 1, \dots, n$, переходим к шагу 5. В противном случае — к шагу 3.

Шаг 3. Если $P_{2n+k+1}^q < E$, то, зафиксировав этот частичный план P^q как выбранный план для дальнейшего продолжения (обозначим его P^s), переходим к шагу 1. Если $P_{2n+k+1}^q \geq E$, то — к шагу 4.

Шаг 4. Среди всех частичных планов P^s , у которых $P_{2n+k+1}^s \neq \infty$, $P_{2n+k+2}^s = 0$, находим некоторый частичный план P^l , у которого

$$P_{2n+k+1}^l = \min_{1 \leq l \leq N} \{P_{2n+k+1}^s \mid P_{2n+k+2}^s = 0\}; \\ P_{2n+k+1}^s < E\} = F_{\min}.$$

Если такой частичный план существует, то, зафиксировав этот частичный план P^q как выбранный план для дальнейшего продолжения (обозначим его P^s), переходим к шагу 1. В противном случае — к шагу 6.

Шаг 5. Если $P_{2n+k+1}^q < E$, то полагаем $E = P_{2n+k+1}^q$, запоминаем номер плана P^q как наилучшее текущее допустимое расписание. Если $E \leq F_{\min}$, то переходим к шагу 6. В противном случае — к шагу 4.

Шаг 6. Если $E = \infty$, то задача не имеет допустимых решений, и алгоритм с соответствующим сообщением заканчивает работу. В противном случае в памяти сохранен номер вершины дерева вариантов P^l , определяющей оптимальное расписание, длительность которого равна E . По признакам метки $P_i^l = b_i$ восстанавливается оптимальная последовательность выполнения заданий, в соответствии с которой по формулам (2)—(4) (при условии $R^l = n$) рассчитываются сроки начала и завершения выполнения всех заданий. На этом алгоритм завершает свою работу.

Заметим, что алгоритм А может применяться для получения приближенных (с заданной наперед точностью $\varepsilon = F/F_{\min}$) решений задачи. В этом случае на ша-

ге 0 полагается $F_{\min} = F^0$. Это значение корректируется в сторону увеличения, например, на каждом шаге 3 или шаге 4 $F_{\min} = \min_{1 \leq s \leq N} F_{2n+k+1}^s$. На шаге 5 проверка условия $E \leq F_{\min}$ заменяется проверкой $E \leq \varepsilon * F_{\min}$.

Алгоритм А может также применяться для получения точных и приближенных решений для задач job-shop problem (см., например, [14, 15]), а также flow-shop problem в традиционной постановке, т. е. при отсутствии ограничений на сроки выполнения заданий и времена работы оборудования. В этом случае на шагах 0 и 1 алгоритма не проверяются возможности выполнения системы ограничений задачи, а времена начала и окончания выполнения заданий вычисляются не согласно выражениям (2)–(4), а по упрощенным формулам

$$\theta^s(i_1, 1) = 0, \sigma^s(i_1, 1) = t(i_1, 1) - 1,$$

$$\theta^s(i_1, k) = \sigma^s(i_1, k - 1) + 1,$$

$$\sigma^s(i_1, k) = \sigma^s t(i_1, k - 1) + t(i_1, k) - 1, \quad k = 1, \dots, m.$$

5. ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР

Пусть необходимо построить расписание выполнения восьми заданий, выполняемых на четырех машинах. Последовательность выполнения этих четырех опе-

Таблица 1

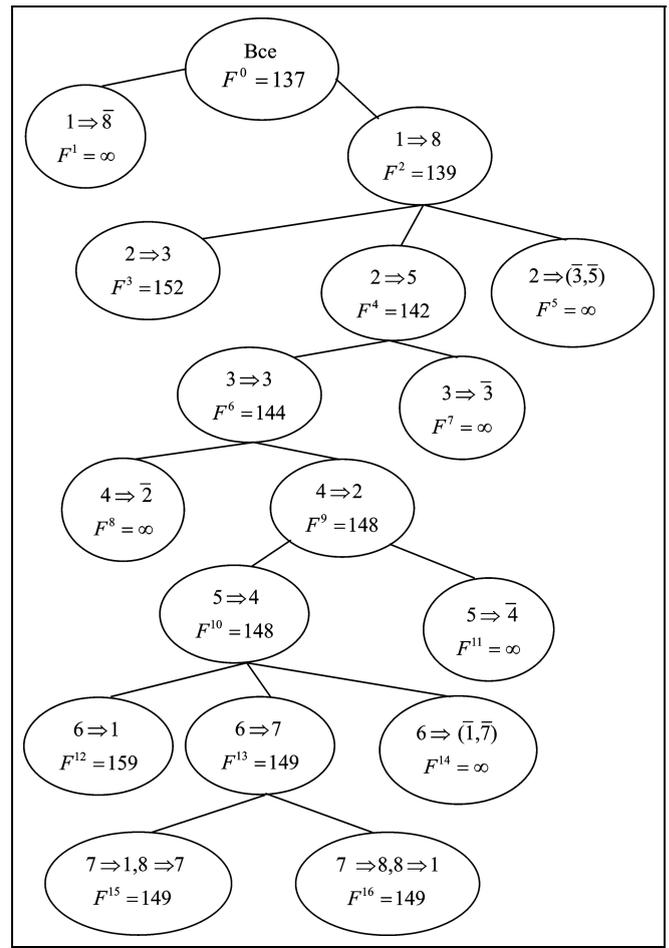
Исходные данные

| i | $k = 1$ | $k = 2$ | $k = 3$ | $k = 4$ | b_i | B_i |
|-------|---------|---------|---------|---------|-------|---------|
| 1 | 10 | 15 | 12 | 7 | 15 | 170 |
| 2 | 6 | 12 | 20 | 10 | 5 | 110 |
| 3 | 8 | 7 | 21 | 15 | 10 | 98 |
| 4 | 15 | 4 | 3 | 25 | 0 | 130 |
| 5 | 6 | 9 | 10 | 15 | 7 | (68) 70 |
| 6 | 4 | 18 | 15 | 6 | 2 | 175 |
| 7 | 13 | 18 | 15 | 10 | 10 | 145 |
| 8 | 3 | 5 | 13 | 15 | 0 | 65 |
| h_k | 5 | 10 | 10 | 20 | — | — |
| H_k | 75 | 120 | 150 | 190 | — | — |

Таблица 2

Наиболее ранние сроки начала и завершения всех операций заданий

| i | $k = 1$ | | $k = 2$ | | $k = 3$ | | $k = 4$ | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | θ | σ | θ | σ | θ | σ | θ | σ |
| 1 | 10 | 24 | 25 | 39 | 40 | 51 | 52 | 58 |
| 2 | 5 | 11 | 12 | 23 | 24 | 43 | 44 | 53 |
| 3 | 10 | 17 | 18 | 24 | 25 | 45 | 46 | 60 |
| 4 | 5 | 19 | 20 | 23 | 24 | 26 | 27 | 51 |
| 5 | 7 | 12 | 13 | 21 | 22 | 31 | 32 | 46 |
| 6 | 5 | 8 | 9 | 26 | 27 | 31 | 32 | 37 |
| 7 | 10 | 22 | 23 | 27 | 28 | 30 | 31 | 40 |
| 8 | 5 | 7 | 10 | 23 | 24 | 39 | 40 | 54 |



Дерево решений задачи

раций для каждого из заданий одинакова. Все исходные данные примера — времена выполнения операций, граничные сроки начала и завершения отдельных заданий и возможностей использования оборудования — сведены в табл. 1.

Наиболее ранние сроки начала и завершения всех операций каждого задания, рассчитанные в соответствии с формулами (2)–(4), приведены в табл. 2.

Нижняя граница длины расписания, рассчитанная по формуле (12), $F^0 = 137$. Далее была проверена совместность системы ограничений. Все условия утверждений 2–4 выполняются. Последовательность (16) в условиях этого примера имеет вид: $B_8 < B_5 < B_3 < B_2 < B_4 < B_7 < B_1 < B_6$. В системе неравенств (17) для пятого задания значение $\delta^0(i_5, 4)$ равно $55 + 15 - 1 = 69$. Так как $69 > 68$, то система ограничений примера несовместна. При корректировке ограничения на время завершения пятого задания ($B_5 = 70$) может быть получено оптимальное решение, которое представлено на рисунке и в табл. 3.

На рисунке приняты следующие обозначения: $r \Rightarrow i$ означает, что на r -е место в последовательности устанавливается i -е задание; $r \Rightarrow \bar{j}$ — на r -е место в последовательности установка j -го задания запрещается.



Таблица 3

**Оптимальная последовательность выполнения заданий.
Сроки начала и завершения выполнения операций**

| i | $k = 1$ | | $k = 2$ | | $k = 3$ | | $k = 4$ | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | θ | σ | θ | σ | θ | σ | θ | σ |
| 8 | 5 | 7 | 10 | 23 | 24 | 39 | 40 | 54 |
| 5 | 8 | 13 | 24 | 33 | 40 | 50 | 55 | 69 |
| 3 | 14 | 21 | 34 | 40 | 51 | 71 | 72 | 86 |
| 2 | 22 | 27 | 41 | 52 | 72 | 91 | 92 | 101 |
| 4 | 28 | 42 | 53 | 56 | 92 | 94 | 102 | 126 |
| 7 | 43 | 55 | 57 | 61 | 95 | 107 | 127 | 136 |
| 1 | 56 | 65 | 66 | 80 | 108 | 119 | 137 | 143 |
| 6 | 66 | 69 | 81 | 98 | 120 | 134 | 144 | 149 |

В полученном решении выполнены все ограничения на сроки выполнения заданий и времена работы машин. Длина расписания равна 149.

С помощью предложенных алгоритмов были решены приведенные в литературе тестовые примеры flow-shop problem без учета ограничений на завершающие сроки выполнения заданий и времена работы машин. Результаты вычислительных экспериментов показали, что эффективность предложенных точных методов для этого класса задач не ниже известных в литературе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулирована обобщенная задача «flow-shop problem» в условиях ограничений на начальные и конечные сроки выполнения заданий и времена работы машин.

Установлены свойства допустимых расписаний сформулированной задачи и получены эффективные оценки нижней границы длины расписания как на начальном этапе процесса решения, так и в процессе решения при построенной подпоследовательности выполнения некоторого подмножества заданий.

Установленные свойства допустимых расписаний позволяют уже на начальных этапах решения установить несовместность исходной системы ограничений, выявить узкие места в ресурсах машин, определить перечни заданий, которые не могут быть выполнены в установленные сроки, а в случае совместности условий задачи, последовательно, на каждом шаге алгоритма существенно сокращать область поиска.

Разработаны алгоритмы точных и приближенных решений задачи на основе метода ветвей и границ. Алгоритмы сконструированы таким образом, что наличие дополнительных условий ограничивает область поиска, делая ее более направленной, благодаря чему в ряде случаев способствует сокращению объема вычислений по сравнению с решением задач на безусловный экстремум.

Эффективность предложенных алгоритмов проиллюстрирована на числовом примере.

Разработано программное обеспечение, позволяющее решать практические задачи размерностью до нескольких десятков заданий в условиях ограничений на времена работы машин и сроки выполнения заданий, выводить результаты решения как в форме таблиц, так и в графической форме — в виде диаграмм Ганта.

Во второй части работы будут предложены некоторые гибридные алгоритмы и приближенные методы решения задач большой размерности, использующие различные известные ранее эвристики и правила предпочтения, а также локальные улучшения построенных на основе эвристик последовательностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Domschke W., Scholl A., Voß S. Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. — Berlin: Springer Verlag, 1997. — 456 p.
2. Johnson S.M. Optimal-two-and tree stage production schedules with setup times included // Research Logistics Quarterly. — 1954. — N 1. — P. 61–68.
3. Gupta J.N.D. A functional heuristic algorithm for the flow-shop scheduling problem // Operational Research Quarterly. — 1971. — N 2. — P. 39–47.
4. Cambell H.G., Dudek R.A., Smith M.L. A heuristic algorithm for the n job, m machine sequencing problem // Management Science. — 1970. — Vol. 16. — P. 630–637.
5. Ignall E., Schrage L. Application of the branch and bound technique to some flow-shop scheduling problems // Operations Research. — 1965. — N 3. — P. 400–412.
6. Potts C.N. A adaptive branching rule for the permutation flow-shop problem // European Journal of Operational Research. — 1980. — N 5. — P. 19–25.
7. Lomnicki Z.A. A branch-and-bound algorithm for the exact solution of the three-machine scheduling problem // Operational Research Quarterly. — 1965. — Vol. 16. — P. 89–100.
8. Brucker P. Scheduling algorithms. — Berlin: Springer Verlag, 1995.
9. Blazewicz J., Domschke W., Pesch E. The job shop scheduling problem: Conventional and new solution techniques // European Journal of Operational Research. — 1996. — Vol. 93. — P. 1–33.
10. Hundal T.S., Rajgopal J. An extension of Palmer's heuristic for the flow-shop scheduling problem // International Journal of Production Research. — 1988. — Vol. 26. — P. 1119–1124.
11. McMahon G.B. Optimal production schedules for flow shops // Canadian Operations Research Society Journal. — 1969. — N 7. — P. 141–151.
12. Lageweg B.J., Lenstra J.K., Rinnooy Kann A.H.G. A general bounding scheme for the permutation flow-shop problem // Operations Research. — 1978. — Vol. 26. — P. 53–67.
13. Carlier J., Rebai I. Two branch and bound algorithms for the permutation flow-shop problem // European Journal of Operational Research. — 1996. — Vol. 90. — P. 238–251.
14. Танаев В.С., Сотсков Ю.Н., Струсов В.А. Теория расписаний. Многостадийные системы. — М.: URSS, 1989. — 328 с.
15. Зак Ю.А. Некоторые свойства задач теории расписаний // Автоматика и телемеханика. — 1978. — № 1. — С. 123–132.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Зак Юрий Александрович — д-р техн. наук, пенсионер, последнее место работы — Европейский центр по мехатронике (European Centre for Mechatronics Reutershagweg), г. Аахен, Германия,
☎ +49 (0) 241/543255, ✉ yuriy_zack@hotmail.com.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАТОРЫ

С.В. Гуляев, А.М. Шубладзе, С.И. Кузнецов, А.В. Кротов, В.Р. Ольшванг, В.А. Малахов

Предложен способ получения оценки производной гауссовского стационарного сигнала, близкой к оптимальной в среднеквадратическом смысле, когда спектральные плотности полезного сигнала и помехи известны с точностью до уровня. Рассмотрена его реализация с помощью специальным образом организованных нелинейных динамических систем. Дано сравнение с известными способами.

Ключевые слова: дифференцирование, адаптация, оптимальность, гауссовский шум.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из задач, возникающих при синтезе современных высокоэффективных систем управления динамическими объектами, заключается в получении информации о фазовом состоянии этих объектов. Ее решение может быть достигнуто путем разработки устройств, позволяющих получать близкую к оптимальной информацию о производной выходного сигнала объекта как в отсутствии, так и при наличии помех.

При решении подобных задач под оптимальностью часто понимают минимум среднеквадратической ошибки дифференцирования. Достаточно полно такая задача решена в теории винеровской фильтрации, когда полезный сигнал и помеха представляют собой гауссовские сигналы с известными дробно-рациональными спектральными плотностями. Оптимальное решение в этом случае представляет собой линейный оператор с дробно-рациональной передаточной функцией.

Согласно этой теории передаточная функция дифференциатора стремится к идеальному оператору дифференцирования, когда уровень спектральной плотности помехи стремится к нулю. В том случае, когда спектральная плотность помехи неограниченно возрастает, значительно превышая спектральную плотность полезного сигнала, модуль передаточной функции оптимального дифференциатора на всех частотах стремится к нулю.

Формально высказанное утверждение выглядит следующим образом. Пусть наблюдаемый сигнал имеет вид

$$z(t) = x(t) + \varphi(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ — полезный стационарный гауссовский сигнал, $\varphi(t)$ — стационарная гауссовская помеха, некоррелированная с сигналом $x(t)$.

Спектральная плотность полезного сигнала $x(t)$

$$f_x(Q, \omega) = \frac{Q \left(\sum_{j=1}^{m-p} b_j \omega^{2j} + 1 \right)}{\sum_{j=1}^n a_j \omega^{2j} + 1}, \quad (2)$$

где $m < n$, $m - p > 0$, m, p, n, b_j и a_j — известные параметры, $Q > 0$ — неизвестный параметр. Спектральная плотность помехи $\varphi(t)$

$$f_\varphi(R, \omega) = \frac{R \sum_{l=1}^e d_l \omega^{2l}}{\sum_{l=1}^d c_l \omega^{2l} + 1}, \quad (3)$$

где $d < n$, e, d_p, d и c_l — известные параметры, $R > 0$ — неизвестный параметр.

Как следует из работ [1, 2], в этом случае для спектров (2) и (3) передаточная функция оптимального в среднеквадратическом смысле дифференциатора

$$W_{0,q}(i\omega) = \frac{1}{2\pi\psi(i\omega)} \int_0^\infty e^{-i\omega t} dt \int_{-\infty}^\infty \frac{(i\omega)^q f_x(\omega)}{\psi^*(i\omega)} e^{i\omega t} d\omega, \quad (4)$$

где q — порядок дифференцирования оптимального фильтра, функции $\psi(i\omega)$ и $\psi^*(i\omega)$ находятся из уравнения

$$\psi(i\omega)\psi^*(i\omega) = \psi(i\omega)\psi(-i\omega) = f_x(\omega) + f_\varphi(\omega) = f_z(\omega) \quad (5)$$

или из уравнения [2],

$$\begin{aligned} \psi(i\omega) &= \sqrt{R} F(Q/R, i\omega), \\ \psi^*(i\omega) &= \sqrt{R} F(Q/R, -i\omega) \end{aligned} \quad (6)$$



где F — дробно-рациональная функция введенных в выражениях (2) и (3) параметров, а сама передаточная функция (4) с учетом выражений (5), (6) преобразуется к виду

$$W_{оq}(Q/R, p) = \frac{\sum_{j=0}^q k_{qj}(Q/R)(p)^j}{\sum_{j=0}^{n-1} k_{3j}(Q/R)(p)^j + (p)^n}, \quad (7)$$

где $p = i\omega$, q — порядок дифференцирования, n — порядок полинома в знаменателе спектральной плотности (2) полезного сигнала, k_{qj} и k_{3j} — коэффициенты полиномов числителя и знаменателя. Из формулы (7) следует, что параметры полиномов в передаточной функции оптимального дифференциатора являются функциями отношения Q/R , поэтому каждому значению отношения Q/R в постановке (1)—(3) соответствует своя передаточная функция (7).

Из той же теории оптимальной фильтрации следует, что среднеквадратическая ошибка дифференцирования любого дифференциатора с передаточной функцией $W_d(p)$ при $p = i\omega$ определяется выражением

$$\sigma_d^2 = \sigma_{о.д}^2 + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_d(i\omega) - W_{о.д}(i\omega)|^2 f_z(Q, R) d\omega, \quad (8)$$

где

$$\sigma_{о.д}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (|(i\omega)^q|^2 f_x(Q, \omega) - |W_{о.д}(i\omega)|^2 f_z(Q, R, \omega)) d\omega \quad (9)$$

— среднеквадратическая ошибка дифференцирования q -й производной оптимального винеровского дифференциатора.

Таким образом, при линейном способе дифференцирования произвольным линейным дифференциатором среднеквадратическая ошибка может быть только больше ошибки (9) и настолько, насколько больше несовпадение спектральных плотностей их операторов. Далее на основе этого утверждения будет предложен способ синтеза нелинейного дифференциатора, оценивающего первую производную сигнала в постановке (1)—(3), эквивалентная передаточная функция которого при различных значениях отношения Q/R близка к передаточным функциям совокупности оптимальных при тех же значениях Q/R дифференциаторов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Решается практически важная задача близкого к оптимальному в среднеквадратическом смысле дифференцирования гауссовского сигнала со спектральной плотностью полезного сигнала

$$f_x(Q, \omega) = \frac{Q}{\omega^4 + 2\omega^2 + 1}, \quad (10)$$

наблюдаемого на фоне гауссовской аддитивной помехи со спектральной плотностью вида

$$f_\varphi(R, \omega) = R. \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) представляют собой частный случай выражений (2)—(3), поэтому все сделанные во Введении утверждения остаются справедливыми и для спектров (10), (11).

Требуется синтезировать нелинейное дифференцирующее устройство, эквивалентная линеаризованная передаточная функция которого при любом значении Q/R была бы близка к передаточной функции оптимального дифференциатора (7), рассчитанного для того же значения Q/R .

2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Воспользуемся приведенной в работе [2] связью между параметрами спектральных плотностей (10), (11) и передаточной функцией (7) оптимального в среднеквадратическом смысле дифференциатора. Эта передаточная функция в рассматриваемой задаче имеет вид

$$W_{о.д}(Q/R, p) = [(Q/R)p(\sqrt[4]{1+Q/R} + 1 - \sqrt{2}) / [(1 + \sqrt{1+Q/R})(1 + \sqrt[4]{Q/R+1}) \times (\sqrt{1+Q/R} + p\sqrt[4]{1+Q/R\sqrt{2}+p^2})]]. \quad (12)$$

В рассматриваемом частном случае (10), (11) отсюда следует справедливость сделанных ранее утверждений, что порядок передаточной функции оптимального дифференциатора определяется порядком полинома в знаменателе спектральной плотности (10), а ее коэффициенты являются функцией отношения Q/R .

Приближим передаточную функцию (12) близкой к ней передаточной функцией вида

$$W_{н.д}(\hat{Q}/\hat{R}, i\omega) = [i\omega(\sqrt{\hat{Q}/\hat{R}+2} - \sqrt{2})] / [\sqrt{\hat{Q}/\hat{R}+2} + 1 - \sqrt{2} + i\omega(\sqrt[4]{\hat{Q}/\hat{R}+2} + 1 - \sqrt[4]{2}) - \omega^2], \quad (13)$$

зависящей от отношения оценок уровня спектра полезного сигнала \hat{Q} и уровня спектра помехи \hat{R} .

На рис. 1 изображена структурная схема нелинейного помехозащищенного дифференциатора, где $\hat{x}(t)$ — оценка полезной низкочастотной составляющей дифференцируемого сигнала, $\hat{\varphi}(t)$ — оценка высокочастотной помехи, эквивалентная передаточная функция которого определяется выражением (13).

Оценка \hat{Q} уровня спектра сигнала производится с помощью линейного низкочастотного фильтра

$$W_{н.ф}(p) = \frac{k_{н.ф}}{(T_{н.ф}p + 1)^2}, \text{ а оценка } \hat{R} \text{ уровня спектра}$$

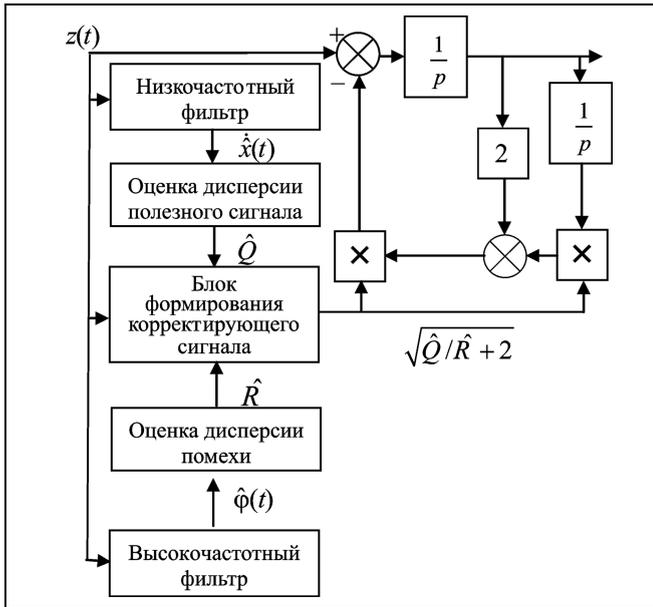


Рис. 1. Схема нелинейного помехозащищенного дифференциатора

помехи — линейным высокочастотным фильтром, $W_{в.ф}(p) = \frac{k_{в.ф}p}{(T_{н.ф}p + 1)^2}$. Оценки \hat{Q} и \hat{R} удовлетворяют уравнениям

$$T_g \dot{\hat{Q}}(t) + \hat{Q}(t) = \hat{x}^2(t), \quad (14)$$

$$T_g \dot{\hat{R}}(t) + \hat{R}(t) = \hat{\phi}^2(t), \quad (15)$$

где T_g — достаточно большая постоянная времени.

С помощью оценок (14), (15), передаточной функции (12) оптимального при любом $Q/R > 0$ дифференциатора и эквивалентной передаточной функции $W_{н.д}(\hat{Q}/\hat{R}, i\omega)$ (13) нелинейного дифференциатора определим в соответствии с формулами (8) и (9) при $q = 1$ среднеквадратические ошибки дифференцирования

$$\sigma_{н.д}^2 = \sigma_{о.д}^2(Q/R) + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{н.д}(Q/R, i\omega) - W_{о.д}(i\omega)|^2 \left(\frac{Q}{1 + \omega^4} + R \right) d\omega, \quad (16)$$

$$\sigma_{о.д}^2(Q/R) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |i\omega|^2 \frac{Q}{1 + \omega^4} - |W_{о.д}(Q/R, i\omega)|^2 \left(\frac{Q}{1 + \omega^4} + R \right) d\omega. \quad (17)$$

На рис. 2—4 приведены зависимости (16) и (17), а также среднеквадратическая ошибка $\sigma_{д.р}^2(Q/R)$

известного [3] релейного дифференциатора с эквивалентной передаточной функцией

$$W_{д.р}(Q/R, i\omega) = \frac{i\omega k_p}{(T_\phi i\omega + 1)(k_p + i\omega(\bar{k} + \bar{\bar{k}}k_p) - \omega^2)},$$

где $T_\phi = 10^{-4}$, $k_p = 2/\sqrt{\pi R}$, $\bar{k} = 16$, $\bar{\bar{k}} = 0,01$, и среднеквадратическая ошибка $\sigma_{д.л}^2(Q/R)$ линейного дифференциатора, оптимального при $Q/R = 10^{-3}$, с передаточной функцией

$$W_{д.л}(Q/R, i\omega) = \frac{0,628i\omega}{3,16 + 7,6i\omega - \omega^2},$$

Из приведенных зависимостей видно, что среднеквадратическая ошибка дифференцирования (16) нелинейного дифференциатора лишь незначительно больше среднеквадратической ошибки (17) оптимального при любых значениях Q/R

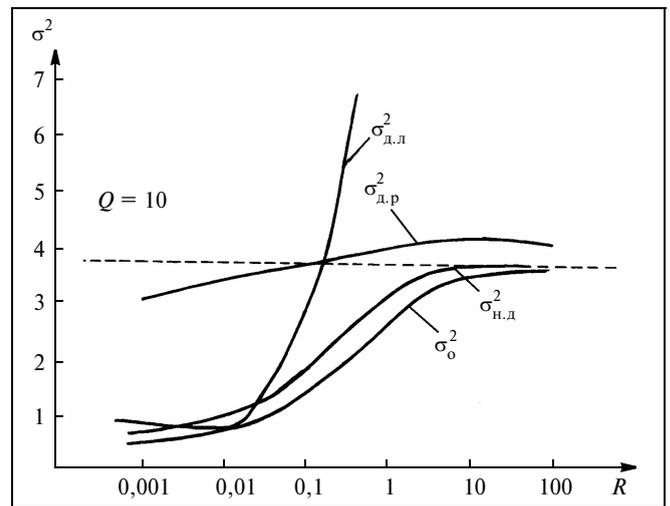


Рис. 2. Оценки дисперсий при высоком уровне сигнала

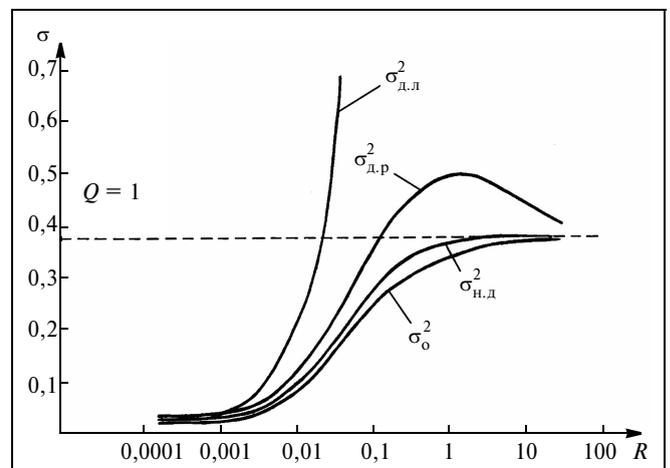


Рис. 3. Оценки дисперсий при среднем уровне сигнала

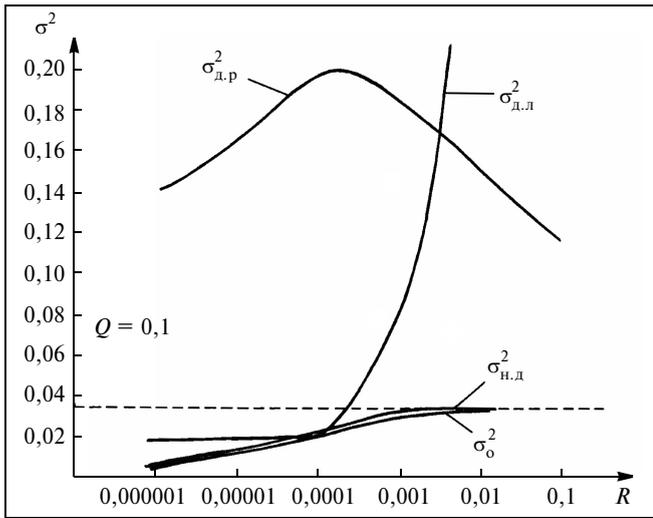


Рис. 4. Оценки дисперсий при низком уровне сигнала

дифференциатора и существенно меньше среднеквадратических ошибок релейного и линейного дифференциаторов. Реализация нелинейного дифференциатора по приведенной на рис. 1 схеме сопоставима по сложности с реализацией релейных [3] и линейных дифференциаторов с постоянными коэффициентами [4].

3. ПРИМЕР

Сравним качественные показатели результатов дифференцирования нелинейным, линейным и релейным дифференциаторами, полученные с помощью моделирования в системе «Matlab».

Дифференцировался сигнал вида $z(t) = A \sin 2\pi Ft + \varphi(t)$, где $A \sin 2\pi Ft$ — дифференцируемый полезный сигнал, $\varphi(t)$ — гауссовская экспоненциально коррелированная помеха. Было выполнено 16 экспериментов, половина из них — без помехи (дисперсия помехи $\sigma_\varphi^2 = 0$), остальные — с помехой ($\sigma_\varphi^2 = 0,1$). Во всех экспериментах частота полезного сигнала $F = 0,0016$ Гц.

Результаты приведены в таблице, где $\sigma_{н.д}^2$, $\sigma_{р.д}^2$ и $\sigma_{л.д}^2$ — среднеквадратические ошибки дифференцирования соответственно нелинейным, релейным и линейным дифференциатором. Для последнего из них при-

Дисперсии ошибок

| A | σ_φ^2 | $\sigma_{н.д}^2$ | $\sigma_{р.д}^2$ | $\sigma_{(T=3 \text{ с})_{л.д}}^2$ | $\sigma_{(T=30 \text{ с})_{л.д}}^2$ |
|-----|--------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 0,1 | 0 | $2,87 \cdot 10^{-6}$ | $1,55 \cdot 10^{-5}$ | $4,0 \cdot 10^{-6}$ | $4,1 \cdot 10^{-4}$ |
| 0,3 | 0 | $1,45 \cdot 10^{-5}$ | $4,3 \cdot 10^{-1}$ | $3,94 \cdot 10^{-5}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,1 | 0,1 | $8,3 \cdot 10^{-4}$ | $2,8 \cdot 10^{-3}$ | $5,8 \cdot 10^{-3}$ | $1,4 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,3 | 0,1 | $2,7 \cdot 10^{-3}$ | $4,93 \cdot 10^{-2}$ | $9,4 \cdot 10^{-3}$ | $4,6 \cdot 10^{-3}$ |

ведены значения ошибки при малой и большой постоянной времени T_ϕ фильтра.

Представленные результаты естественным образом подтверждают сделанные теоретические выводы о том, что нелинейные дифференциаторы во всех рассмотренных случаях лучше малоинерционных линейных дифференциаторов и значительно лучше инерционных линейных и релейных дифференциаторов. Другими словами, предложенное нелинейное дифференцирующее устройство обладает высокими адаптивными возможностями при дифференцировании сигналов с изменяющимися в широких диапазонах параметрами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что методы теории оптимальной фильтрации дают возможность на базе функциональных степенных элементов, множителей и линейных динамических фильтров синтезировать помехозащищенные, обладающие большими адаптивными возможностями и просто реализуемые дифференцирующие устройства, близкие по среднеквадратическим ошибкам к подстраиваемым оптимальным дифференциаторам. Таким образом, рассмотренный способ дифференцирования по своим возможностям качественно превышает возможности других известных и широко применяемых на практике способов дифференцирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Адаптивное* в среднеквадратическом смысле дифференцирование // Управление большими системами / С.В. Гуляев, А.М. Шубладзе, В.А. Малахов и др. — 2010. — № 3. — С. 75—88.
2. *Теория систем с переменной структурой* / С.В. Емельянов, В.И. Уткин, В.А. Таран и др. — М.: Наука, 1970.
3. *Цыткин Я.З.* Теория релейных систем автоматического регулирования. — М.: Гостехиздат, 1955.
4. *Мееров М.В.* Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. — М.: Физматгиз, 1967.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.С. Манделем.

Гуляев Сергей Викторович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, (495) 334-88-81, ✉ svgul@inbox.ru,

Шубладзе Александр Михайлович — д-р техн. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎(495) 334-88-81, ✉ shub@ipu.ru,

Кузнецов Сергей Иванович — ген. директор, Государственный научно-исследовательский институт тепловыделительного приборостроения, г. Москва, ☎(495) 615-21-90, www.niiteplopribor.ru,

Кротов Александр Васильевич — нач. управления, ОАО «Газавтоматика», г. Москва, ☎(499) 580-41-22, ✉ alex_k@gazauto.gazprom.ru,

Ольшванг Владимир Рафаилович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, (495) 334-88-81,

Малахов Валерий Александрович — канд. физ.-мат. наук., ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎(495) 334-88-81.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ КАК СРЕДСТВО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АДАПТИВНОСТИ ФИРМЫ В НЕСТАБИЛЬНОЙ СРЕДЕ

А.А. Коломоец, В.В. Клочков

Предложена экономико-математическая модель фирмы, содержащей в своем контуре управления систему поддержки принятия решений. Введены показатели качества и эффективности информационных систем (ИС) данного класса. Рассмотрена задача оптимизации параметров ИС в смысле максимизации ожидаемой прибыли фирмы. Разработанные подходы продемонстрированы на примере системы учета числа проданных авиабилетов.

Ключевые слова: информационная система, экономическая эффективность, имитационное моделирование, ограниченная рациональность, контур управления, адаптивность.

ВВЕДЕНИЕ

Информационные системы (ИС) не приносят экономического эффекта сами по себе, однако они позволяют реализовать более эффективные стратегии бизнеса [1–3]. Представляется целесообразным рассматривать ИС как звено в контуре управления организацией.

При таком подходе появляется возможность применять методологию, развитую в целях разработки систем управления техническими объектами, в частности, применять средства численного (имитационного) моделирования, например, MatLab/Simulink [4–6]. В рамках такого подхода приобретают вполне определенный смысл понятия наблюдаемости, управляемости, устойчивости и др. Соответствующие этим понятиям характеристики вполне можно рассматривать как свойства «мягкой» модели [7], в отличие от количественных результатов моделирования, которые, с одной стороны, должны базироваться на больших объемах статистических данных, а с другой, заслуживают значительно меньшего доверия.

Информационные системы, в частности, системы поддержки принятия решений (СППР) позволяют автоматизировать сбор и обработку информации как о текущем состоянии окружающей среды, так и о тенденциях происходящих изменений. Это повышает *адаптивность* организации [8], т. е.

дает ей возможность активно реагировать на изменения окружающей среды с положительным экономическим эффектом — например, получая приращение прибыли (или, по крайней мере, минимизируя потери). Наличие ИС снижает остроту проблемы *ограниченной рациональности* при принятии решений, подробно рассматриваемой в рамках институциональной экономики [9].

Наличие СППР в контуре управления организации позволяет реализовать новые модели поведения фирм, характеризующиеся способностью подстраиваться под изменения окружающей среды. Экономический эффект (например, приращение прибыли предприятия с учетом затрат на создание и поддержку ИС), который может быть достигнут таким образом, будем считать мерой эффективности СППР. Далее изложены подходы к решению двух задач: оценки экономической эффективности ИС и оптимизации ее параметров для обеспечения максимальной эффективности.

1. УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ФИРМЫ В НЕСТАБИЛЬНОЙ СРЕДЕ

Рассмотрим каждый из элементов схемы, приведенной на рис. 1.

Среда. Здесь под средой подразумевается окружение фирмы — рыночное, макроэкономическое, институциональное, технологическое и др. Пола-

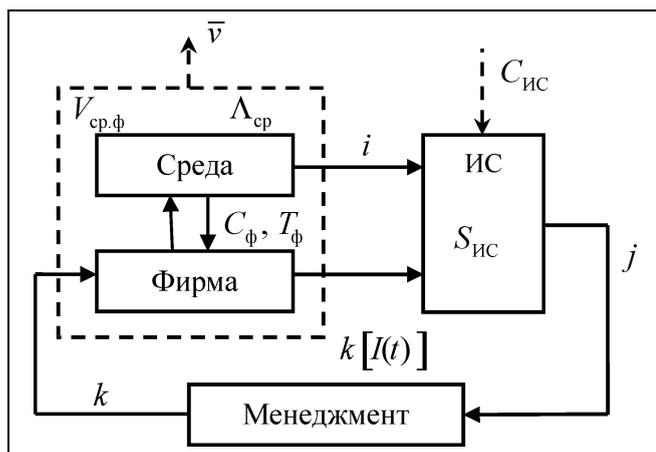


Рис. 1. Контур управления предприятия (фирмы):

i — действительное состояние среды; j — идентифицированное состояние среды; k — избранная стратегия поведения; $\Lambda_{\text{ср}}$ — переходная матрица среды; $V_{\text{ср.ф}}$ — платежная матрица; $C_{\text{ф}}$ и $T_{\text{ф}}$ — матрицы материальных и временных затрат на смену стратегии поведения; $S_{\text{ИС}}$ — матрица, характеризующая качество ИС; \bar{v} — средняя прибыль фирмы в единицу времени без учета затрат на ИС; $C_{\text{ИС}}$ — затраты на ИС

гаем, что действия фирмы не влияют на окружающую среду (ситуация совершенной конкуренции). Среда может находиться в одном из многих возможных состояний. Считая число состояний конечным и равным $n_{\text{ср}}$, далее будем обозначать состояния среды индексами $i = 1, \dots, n_{\text{ср}}$. Будем описывать динамику среды дискретным марковским процессом с переходной матрицей $\Lambda_{\text{ср}}$, задающей вероятности перехода между соответствующими состояниями среды в единицу времени (*интенсивности* перехода). Переходная матрица полностью характеризует с вероятностной точки зрения случайный процесс изменения состояния среды и, в частности, позволяет вычислять [10]: характерное время перехода системы в установившийся режим $\tau_{\text{ср}} = -1/\ln \lambda_{\text{max}}$, где λ_{max} — максимальное собственное число матрицы $\Lambda_{\text{ср}}$, меньшее единицы, а также в установившемся режиме:

- вероятности $\{p_i\}$ обнаружить среду в любом заданном состоянии как компоненты собственного вектора матрицы $\Lambda_{\text{ср}}$, соответствующего собственному числу 1 (можно показать, что для переходной матрицы такое собственное число всегда существует),

- интенсивности переходов между i -м и j -м состояниями среды $\eta_{ij} = \lambda_{ij} p_j$;

- средние продолжительности непрерывного пребывания среды в любом заданном состоянии $T_i = 1/(1 - \lambda_{ii})$.

Дополнительно предположим, что, кроме краткосрочных изменений состояния среды, определя-

емых переходной матрицей $\Lambda_{\text{ср}}$, существуют «структурные сдвиги», т. е. качественные изменения поведения среды, приводящие к существенному изменению самой переходной матрицы. Обозначим характерное время, в течение которого переходная матрица $\Lambda_{\text{ср}}$ неизменна, $T_{\text{ср}}$. Для того, чтобы дальнейшие рассуждения имели смысл, необходимо, чтобы выполнялось условие $T_{\text{ср}} \gg \tau_{\text{ср}}$.

Фирма. Состояние фирмы определяется принятой стратегией¹ поведения k . В качестве примеров стратегий можно привести выбор объемов выпуска и ассортимента продукции, поставщиков, способов инвестирования средств, продуктовой линейки [8], целевой аудитории и т. д. Считая число возможных стратегий конечным и равным $n_{\text{ф}}$, далее будем обозначать стратегии $k = 1, \dots, n_{\text{ф}}$.

Мобильность фирмы характеризуется издержками и временем, необходимым на смену стратегии. Издержки на смену стратегий опишем матрицей $C_{\text{ф}}$ размерностью $n_{\text{ф}} \times n_{\text{ф}}$, каждый элемент которой c_{kl} определяет издержки на смену стратегии k на стратегию l . Время, необходимое для смены стратегий, опишем матрицей $T_{\text{ф}}$ размерностью $n_{\text{ф}} \times n_{\text{ф}}$, каждый элемент которой T_{kl} определяет время, необходимое для смены стратегии k на стратегию l . Будем считать, что T_{kl} включает в себя также время установления равновесия между средой и фирмой после смены стратегии.

Информационная система поддержки принятия решений. Качество ИС (в данном случае СППР) будем моделировать матрицей $S_{\text{ИС}}$, каждый элемент которой s_{ij} определяет вероятность того, что ИС идентифицирует состояние среды i как j . Для идеальной ИС, очевидно, матрица $S_{\text{ИС}}$ будет единичной, а по мере совершенствования реальной ИС — будет стремиться к этому идеалу. В данной работе для простоты будем полагать, что изменение качества ИС происходит скачкообразно (рис. 2). При этом диагональные элементы матрицы $S_{\text{ИС}}$ изменяются от начального значения $1/n_{\text{ср}}$ до конечного p_{max} . Соответственно, недиагональные элементы $S_{\text{ИС}}$ изменяются от начального значения $1/n_{\text{ср}}$ до конечного $(1 - p_{\text{max}})/(n_{\text{ср}} - 1)$. Скачок происходит по прошествии времени $T_{\text{ИС}}$, которое является случайной величиной, зависящей от количества вложенных в развитие системы средств.

¹ Здесь стратегия понимается так, как это принято в теории игр [11], т. е. как вариант поведения, а не в смысле, принятом в теории стратегического управления, т. е. как долгосрочная программа развития.

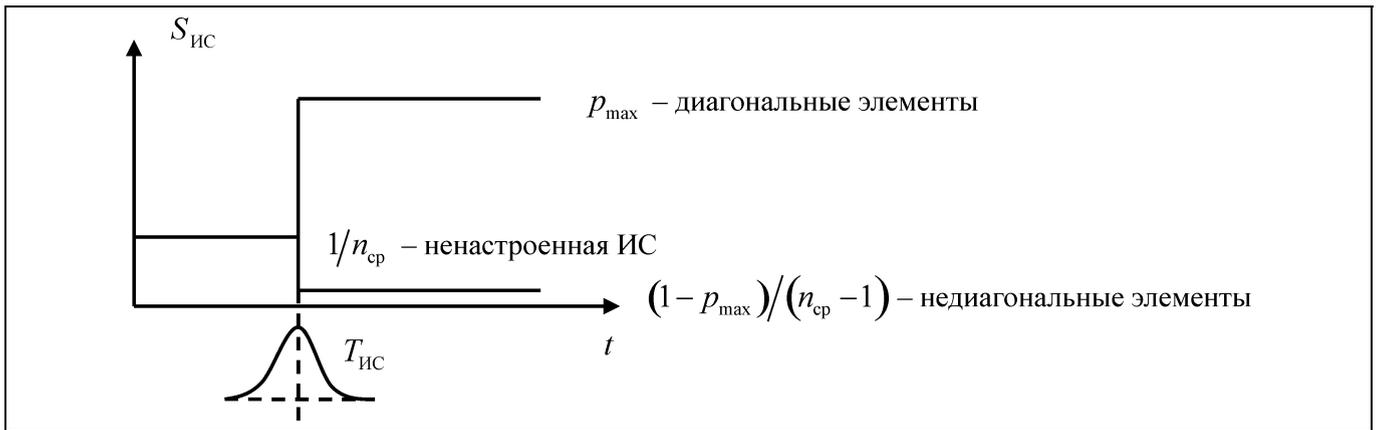


Рис. 2. Процесс обучения ИС

Будем считать, что известна зависимость $C_{ИС}(p_{\max}, T_{ИС})$ полных издержек на поддержание ИС в единицу времени от ее качества и времени, необходимого на ее разработку. Предположим, что зависимости $T_{ИС}(C_{ИС})$ и $p_{\max}(C_{ИС})$ качественно имеют вид, отраженный на рис. 3.

Считаем, что на протяжении каждого периода $T_{ср}$, в течение которого переходная матрица $\Lambda_{ср}$ неизменна (поведение среды качественно не изменяется), издержки $C_{ИС}$ складываются из постоянной FC (на создание) и переменной VC (на поддержание работоспособности) частей:

$$C_{ИС}(p_{\max}, T_{ИС}) = FC(p_{\max}, T_{ИС}) + VC(p_{\max}, T_{ИС})T_{ср}.$$

Взаимодействие фирмы со средой. Возможные результаты взаимодействия фирмы с окружающей средой будем характеризовать платежной матрицей $V_{ср.ф}$ размерностью $n_{ср} \times n_{ф}$. Каждый ее элемент v_{ik} — прибыль (в единицу времени) фирмы, избравшей стратегию поведения i при состоянии окружающей среды k (издержки на ИС при вычислении v_{ij} не учитываются).

В случае если денежные и временные издержки на изменение стратегии отсутствуют (абсолютная

адаптивность), оптимальная в смысле максимизации прибыли стратегия определяется следующим образом:

$$k_1(i) = \arg \max_k v_{ik}. \quad (1)$$

В другом предельном случае, когда издержки на изменение стратегии достаточно велики (нулевая адаптивность), оптимальной становится стационарная стратегия:

$$k_0 = \arg \max_k \sum_i v_{ik} p_i. \quad (2)$$

Введем обозначения:

$$\bar{v}_1 = \bar{\pi}_1 = \sum_i p_i \max_k v_{ik} = \sum_i p_i v_{ik_1(i)},$$

$$\bar{v}_0 = \bar{\pi}_0 = \max_k \sum_i p_i v_{ik} = \sum_i v_{ik_0} p_i. \quad (3)$$

В терминах теории статистических игр разность $\bar{\pi}_1 - \bar{\pi}_0 = \Delta\pi$ называется *ценой полной информации* в соответствующей игре [8].

В случае конечных издержек на изменение стратегии (в том числе на определение текущего состояния окружающей среды i и оптимальной для данного состояния стратегии, что и достигается с помощью СППР), оптимальным в смысле максимизации прибыли будет уже более сложное поведение. Очевидно, при прочих равных, всегда должно выполняться соотношение $\bar{\pi}_0 \leq \bar{\pi} \leq \bar{\pi}_1$.

Менеджмент. Задача менеджмента в краткосрочном периоде заключается в том, чтобы по последовательности состояний среды $i(t)$ формировать оптимальную (в смысле максимизации средней прибыли $\bar{\pi}$) последовательность стратегий фирмы $k[i(t)]$. Простейшие случаи такой оптимизации при абсолютной и нулевой адаптивности были рассмотрены ранее (формулы (1), (2)).

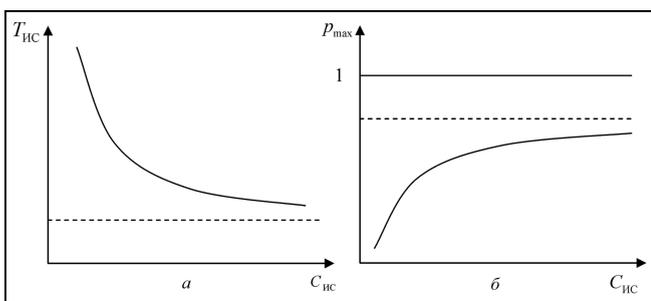


Рис. 3. Качественный вид зависимости ожидаемого времени настройки (а) и показателя качества ИС (б) от затрат на ее создание



В долгосрочном периоде задача менеджмента — выбор оптимального уровня издержек на развитие информационной системы $C_{ИС}$.

2. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИС И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАТРАТ НА ЕЕ СОЗДАНИЕ И ПОДДЕРЖАНИЕ

В отличие от известных работ, посвященных оценке экономической эффективности ИС, здесь под эффективностью (потенциальной) ИС предлагается понимать приращение прибыли $\bar{\pi} - \bar{\pi}_0$, получаемое в результате перехода фирмы к адаптивной смене стратегий. Гибкая смена стратегий становится возможной, прежде всего, благодаря ускорению процессов сбора и обработки информации при внедрении СППР. Разумеется, повышение адаптивности требует, кроме внедрения ИС, изменения модели поведения фирмы, модификации алгоритмов принятия решений менеджментом и других системных изменений.

2.1. Эффективность идеальной ИС

В общем случае, когда на протяжении промежутка времени T_{cp} фирма изменяет свою стратегию при каждом изменении состояния среды, бу-

дет получена следующая прибыль: $\Pi = \sum_{i=1}^{T_{cp}} v_{i(i)k(i)} - \sum_{t=1}^{T_{cp}} c_{k(t-1)k(t)} - C_{ИС}$. Усреднив последнее выражение по времени и разделив на T_{cp} , получим среднюю прибыль фирмы в единицу времени:

$$\bar{\pi} = \sum_{i,k} v_{ik} p_i p_{ki} - \sum_{k,l} c_{kl} \eta_{kl} - \frac{C_{ИС}}{T_{cp}} = \bar{v} - \frac{C_{ИС}}{T_{cp}}. \quad (4)$$

Здесь p_{ki} — вероятность того, что фирма действует в соответствии со стратегией k при состоянии i среды, η_{kl} — интенсивность переходов со стратегии k на стратегию l . Очевидно, для корректного усреднения, необходимо, чтобы $T_{cp} \gg \max(T_i, T_k)$, где T_i — среднее время, в течение которого сохраняется состояние i среды, T_k — среднее время, на протяжении которого фирма придерживается стратегии k .

Предельный случай высокой адаптивности. Рассмотрим ситуацию, когда характерное время, в течение которого сохраняется неизменным состояние среды, существенно больше, чем время, необходимое фирме на смену стратегии: $T_i \gg T_{kl}$. Кроме того, издержки на смену стратегии существенно меньше, чем прибыль, получаемая фирмой за время сохранения соответствующего состояния

среды: $(T_i - T_{kl})v_{ik} \gg C_{kl}$. Вместе эти условия приводят к тому, что при максимизации прибыли:

- переключения стратегий происходят всегда;
- на каждом промежутке времени оптимальная стратегия избирается независимо.

Последнее, в частности, означает, что каждому изменению состояния среды однозначно соответствует изменение стратегии, причем $k(i) = k_1(i) = \arg \max_k v_{ik}$ в любой момент времени за исключением промежутков T_{kl} после каждого изменения состояния среды, необходимых на изменение стратегии. Это позволяет применить подход, предложенный в работе [8], и сформировать матрицы C'_{ij} , T'_{ij} и Z_{ij} соответственно материальных, временных и полных затрат фирмы, связанных с изменением состояния среды с i на j , состоящие из следующих элементов: $c'_{ij} = c_{k_1(i)k_1(j)}$, $T'_{ij} = T_{k_1(i)k_1(j)}$, $z_{ij} = c'_{ij} + T'_{ij}(v_{jk_1(i)} - v_{jk_1(j)})$. Предполагается, что на переходном промежутке T'_{ij} фирма придерживается стратегии, которая была оптимальной в предыдущем состоянии среды. В результате, выражение для средней прибыли в единицу времени упрощается следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{\pi}_3 &= \sum_i v_{ik_1(i)} p_i - \sum_{i,j} c'_{ij} \eta_{ij} - \sum_{i,j} T'_{ij} (v_{jk_1(i)} - \\ &- v_{jk_1(j)}) \eta_{ij} - \frac{C_{ИС}}{T_{cp}} = \sum_i v_{ik_1(i)} p_i - \sum_{i,j} z_{ij} \eta_{ij} - \frac{C_{ИС}}{T_{cp}} = \\ &= \bar{v}_3 - \frac{C_{ИС}}{T_{cp}}. \end{aligned} \quad (5)$$

В этом случае эффективность ИС можно оценить следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta\pi_{ИС} &= \bar{\pi} - \bar{\pi}_0 = (\bar{\pi}_1 - \bar{\pi}_0) + \bar{\pi} - \bar{\pi}_1 = \\ &= \Delta\pi - \sum_{i,j} z_{ij} \eta_{ij} - \frac{C_{ИС}}{T_{cp}}. \end{aligned}$$

За «нулевой» (при отсутствии ИС) уровень принята оптимальная стационарная стратегия, которой соответствует прибыль $\bar{\pi}_0$. Это предположение не влияет на решение $C_{ИС}^*$ задачи оптимизации уровня затрат на СППР $\frac{d\Delta\pi_{ИС}}{dC_{ИС}} = 0$, но определяет раз-

мер приращения прибыли $\Delta\pi_{ИС}(C_{ИС}^*)$ при внедрении СППР. Последнее означает, что выбор «нулевого» уровня может существенно повлиять на принятие решения о целесообразности внедрения ИС при сравнении с альтернативными путями расходования средств.

2.1. Эффективность реальной ИС

Обозначим $p_{ИС}$ вероятность того, что ИС верно идентифицирует состояние среды (параметр качества ИС). Тогда по завершении процесса обучения СППР диагональные элементы матрицы $S_{ИС}$ (см. § 1) будут равны $p_{ИС}$, а недиагональные — $(1 - p_{ИС})/(n_{ср} - 1)$.

Неидеальность ИС неизбежно приводит к нарушению условия оптимальности (1), что не позволяет напрямую воспользоваться достигнутыми упрощениями (см. п. 2.1).

Вернемся к исходному выражению для средней прибыли в единицу времени (4) $\bar{\pi} = \sum_{i,k} v_{ik} p_i p_{ki} - \sum_{k,l} c_{kl} \eta_{kl}$. Учитывая, что издержки на развитие ИС зависят от качества информационной системы и ожидаемого времени ее настройки: $C_{ИС} = C_{ИС}(p_{\max}, T_{ИС})$, вместо величин $\bar{\pi}$ будем использовать $\bar{v} = \bar{\pi} - C_{ИС}/T_{ср}$.

Далее сохраним предположение о высокой адаптивности в том смысле, что переключения стратегий происходят всегда и на каждом промежутке времени стратегия избирается независимо. Откажемся только от условия локальной оптимальности производимого выбора. Будем также считать, что неадекватно избранные стратегии не исправляются (т. е. выбранная фирмой стратегия может изменяться только в результате последующего изменения состояния среды). Как и раньше, наличие промежутка времени, необходимого на смену стратегии, будем учитывать при вычислении полных издержек на смену стратегии.

Заметим, что при выборе стратегии поведения информация об истинном состоянии среды оказывается недоступной, и выбор приходится делать, основываясь на ее «фиктивном» состоянии, определяемом СППР. В соответствии с § 1, фиктивное состояние i' связано с реальным состоянием i только вероятностным образом. Отсутствие функциональной связи означает, что «фиктивное» состояние может изменяться, в то время как реальное состояние остается неизменным, и наоборот. В результате, фирма будет вынуждена, исходя из ложной информации, необоснованно изменять стратегию поведения. Статистическая связь между реальным и «фиктивным» состояниями задается матрицей $S_{ИС}$, каждый элемент которой s_{ij} — вероятность того, что СППР идентифицирует истинное состояние среды i как состояние i' .

Рассмотрим статистические величины, характеризующие «фиктивное» состояние среды на выходе СППР: $\lambda'_{ij} = \eta'_{ij}/p'_i$ — элемент фиктивной

переходной матрицы, $\eta'_{ij} = \sum_{i,j} \eta_{ij} s_{ii} s_{jj}$ — интенсивность переходов между фиктивными состояниями i' и j' , $p'_i = \sum_i p_i s_{ii}$ — вероятность обнаружить систему в фиктивном состоянии i' .

Выражение для средней прибыли в единицу времени принимает следующий вид:

$$\bar{v} = \sum_{i,i'} v_{ik_1(i)} p_i s_{ii'} - \sum_{i,j'} c'_{ij'} \eta'_{ij'} - \sum_{i,j,i',j'} T''_{ij'} (v_{jk_1(j)} - v_{jk_1(i)}) \eta_{ij} s_{ii'} s_{jj'} \quad (6)$$

Здесь $T''_{ij'}$ — ожидаемое время, в течение которого фирма будет переходить на новую стратегию в результате изменения фиктивного состояния среды с i' на j' . Оно определяется по формуле

$$T''_{ij'} = \sum_{T_j=0}^{T'_{ij'}} T_j (\lambda'_{jj'})^{T_j-1} (1 - \lambda'_{jj'}) + T'_{ij'} \sum_{T_j=T'_{ij'}+1}^{\infty} (\lambda'_{jj'})^{T_j-1} (1 - \lambda'_{jj'}) = \frac{1 - (\lambda'_{jj'})^{T'_{ij'}}}{1 - \lambda'_{jj'}}$$

где T_j — случайная величина, представляющая собой время, в течение которого сохраняется фиктивное состояние среды j' , $T'_{ij'}$ — матрица временных затрат фирмы, связанных с изменением состояния среды с i' на j' . Когда $T_j \leq T'_{ij'}$, имеем $T''_{ij'} = T_j$. В противном случае, когда $T_j > T'_{ij'}$, выполняется $T''_{ij'} = T'_{ij'}$.

В выражении (6), кроме предположения о высокой адаптивности $T_i \gg T_{kl}$ (реальное состояние среды не меняется на протяжении промежутка времени T_{kl}), предполагается также, что $j' \neq i' \Rightarrow k_1(j') \neq k_1(i')$ (при изменении фиктивного состояния среды всегда меняется и стратегия поведения фирмы). Таким образом, приведенное выражение остается в значительной степени приближенным.

В предельном случае высокой адаптивности фирмы в фиктивной среде ($\bar{T}_j \gg T'_{ij'}$) выполняется $T''_{ij'} = T'_{ij'}$, и можно показать, что \bar{v} является квадратичной (близкой к линейной) функцией от показателя качества ИС $p_{ИС}$, однако для неразвитых (необученных) ИС при ненулевой матрице $T'_{ij'}$ этот предельный случай никогда не реализуется. Это объясняется тем, что использование необученной СППР приводит к большому числу необоснованных изменений стратегии поведения:



$p_{ИС} \rightarrow 1/n_{ср} \Rightarrow \lambda'_{ij'} \rightarrow 1/n_{ср} \Rightarrow \bar{T}_{j'} \rightarrow n_{ср}/(n_{ср} - 1) \gg T'_{ij'}$, в то время как для высокой адаптивности необходимо $\bar{T}_{j'} \gg T'_{ij'}$. Далее предположение о линейной зависимости $\bar{v}(p_{ИС})$ будет введено искусственно, что оказывается, как будет показано, вполне оправданным.

Частный случай «необученной» ИС. Подставим в выражение для средней прибыли в единицу времени (6) $p_{ИС} = 1/n_{ср}$. Тогда $s_{ii'} = 1/n_{ср}$, $\eta'_{ij'} = 1/n_{ср}^2$, $p'_{i'} = 1/n_{ср}$, $\lambda'_{ij'} = 1/n_{ср}$, $T''_{ij'} \sim 1$,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n_{ср}^2} \frac{1}{n_{ср}} \sum_{i,j,i',j'} (v_{jk_1(j')} - v_{jk_1(i)}) \eta_{ij} = \\ & = \frac{1}{n_{ср}} \frac{1}{n_{ср}} \left(\sum_{i,j,j'} v_{jk_1(j')} \eta_{ij} - \sum_{i,j,i'} v_{jk_1(i)} \eta_{ij} \right) = 0, \\ & \bar{v}_2 = \frac{1}{n_{ср}} \sum_{i,i'} v_{ik_1(i)} p_i - \frac{1}{n_{ср}} \sum_{i',j'} c'_{ij'}. \end{aligned} \quad (7)$$

Линейное приближение зависимости $\bar{v}(p_{ИС})$. Используя найденные ранее граничные значения $\bar{v}(1/n_{ср}) = \bar{v}_2$, $\bar{v}(1) = \bar{v}_3$, выполним линейную интерполяцию искомой зависимости:

$$\bar{v}(p_{ИС}) = \bar{v}_2 + \frac{\bar{v}_3 - \bar{v}_2}{1 - 1/n_{ср}} (p_{ИС} - 1/n_{ср}). \quad (8)$$

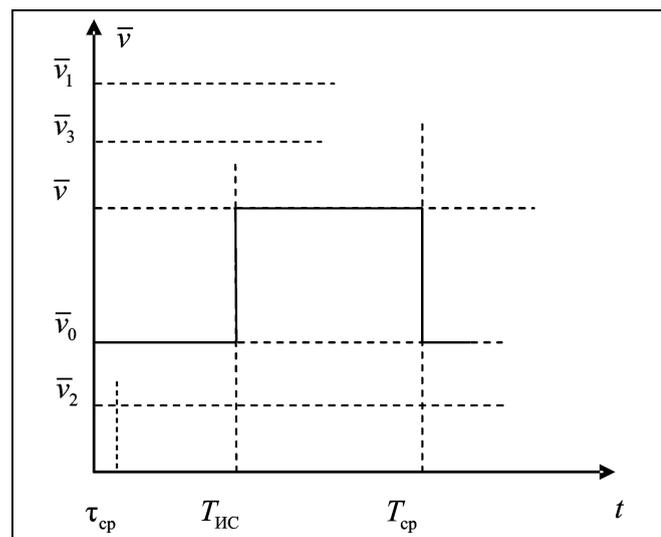


Рис. 4. Эффективность ИС в долгосрочном периоде: \bar{v}_1 — идеальная адаптивность; \bar{v}_3 — идеальная ИС; \bar{v} — неидеальная ИС; \bar{v}_0 — стационарная стратегия; \bar{v}_2 — «необученная» ИС

2.3. Эффективность ИС в долгосрочном периоде

Как видно из рис. 4, при усреднении в долгосрочном периоде в выражение для эффективности ИС нужно вводить поправку на то, что СППР не может применяться на всех промежутках времени:

$$\Delta\pi_{ИС} = (\bar{v} - \bar{v}_0)(T_{ср} - T_{СИ})/T_{ср} - C_{ИС}/T_{ср}. \quad (9)$$

2.4. Оптимизация качества и стоимости ИС

Выразив в явном виде зависимость эффективности ИС от показателей ее качества, можно ставить задачу поиска оптимальных (в смысле максимизации прибыли) значений как самих этих показателей, так и издержек, связанных с их достижением:

$$\begin{aligned} \Delta\pi_{ИС} &= \Delta\pi_{ИС}(p_{\max}, T_{ИС}, C_{ИС}(p_{\max}, T_{ИС})); \\ \frac{d\Delta\pi_{ИС}}{dp_{\max}} &= 0, \quad \frac{d\Delta\pi_{ИС}}{dT_{ИС}} = 0 \Rightarrow p_{\max}^*, \\ T_{ИС}^* &\Rightarrow FC_{ИС}^*, VC_{ИС}^*. \end{aligned} \quad (10)$$

3. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для демонстрации предложенного подхода к оценке эффективности ИС и оптимизации ее параметров и стоимости возьмем за основу упрощенный пример, приведенный в работе [8]. Оценим эффективность системы централизованного учета числа проданных авиабилетов как средства оптимизации динамического выбора используемых авиакомпанией воздушных судов. В условиях постоянно изменяющегося спроса на пассажирские авиаперевозки, в том числе на отдельных авиалиниях, у авиакомпаний существует возможность маневра парком воздушных судов, т. е. их перестановки с одной авиалинии на другую, поскольку для каждой конкретной авиалинии, при заданном пассажиропотоке, будет оптимальным использование определенного типа воздушных судов. Для проведения такой политики, очевидно, необходима своевременная информация о числе проданных авиабилетов на каждый конкретный рейс, которая может быть получена лишь при наличии соответствующей информационной системы. Реальным примером такой системы можно считать успешно функционирующую до настоящего времени систему резервирования авиабилетов «Сирена», разработана которой была начата в середине 1960-х гг. в ИПУ РАН под руководством В.А. Жожикашвили [12].

Предположим, что единственным параметром, характеризующим состояние окружающей среды, служит пассажиропоток на данной авиалинии, который может изменяться от 125 до 325 пассажиров за рейс. Этот параметр может изменяться по многим причинам (сезонные колебания, уровень доходов населения, ценовая и маркетинговая политика данной авиакомпании и ее конкурентов, случайные флуктуации). Разделим диапазон изменения пассажиропотока на четыре интервала с границами 125—174, 175—224, 225—274, 275—325 пассажиров за рейс.

Пусть интенсивность изменений пассажиропотока на данной авиалинии описывается переходной матрицей

$$\Lambda_{cp} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,2 & 0,25 & 0,05 \\ 0,15 & 0,5 & 0,25 & 0,1 \\ 0,1 & 0,5 & 0,3 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,6 & 0,2 \end{pmatrix}.$$

Ее элементы λ_{ij} оцениваются как частоты переходов пассажиропотока из диапазона i в диапазон j в единицу времени, в качестве которой здесь выступает интервал между рейсами.

Предположим, что продолжительность жизненного цикла системы централизованного учета числа проданных авиабилетов в среднем составляет 10 лет ($T_{cp} = 8000$ рейсов). Такое ограничение может быть обусловлено:

- моральным устареванием используемых информационных технологий (в качестве возможных причин можно привести расширение сети кассовых терминалов, изменение принятых стандартов обслуживания пассажиров, обновление материально-технической базы и программного обеспечения);

- корректировкой требований к информационной системе (вследствие качественного изменения переходной матрицы Λ_{cp} , вызванного, например, модернизацией парка воздушных судов или изменением географии полетов).

Стратегией авиакомпании в данном примере служит выбор подходящих типов воздушных судов для обслуживания авиалинии. Предположим, что на данном маршруте авиакомпания может эксплуатировать воздушные суда трех типов, которые различаются максимальной пассажироместимостью, составляющей соответственно 200, 250 и 350 мест. Пусть платежная матрица $V_{cp,\phi}$, а также матрицы материальных C_ϕ и временных T_ϕ затрат на смену стратегии имеют следующий вид:

$$V_{cp,\phi} = \begin{pmatrix} 8\,000 & 4\,000 & 0 \\ 9\,000 & 10\,000 & 7\,000 \\ 9\,000 & 12\,000 & 14\,000 \\ 9\,000 & 12\,000 & 16\,000 \end{pmatrix},$$

$$C_\phi = \begin{pmatrix} 0 & 1\,500 & 2\,200 \\ 1\,000 & 0 & 2\,200 \\ 1\,200 & 1\,700 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_\phi = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Элементы платежной матрицы v_{ik} определяются как ожидаемая прибыль (в условных единицах) за рейс в случае выбора воздушного судна типа k при значении пассажиропотока в диапазоне i . Элементы матрицы материальных затрат c_{kl} задают стоимость (в усл. ед.) замены типа воздушного судна, используемого в данном рейсе. Значения T_{kl} определяют время, необходимое для выполнения такой замены (здесь считается, что при наличии своевременной информации замена воздушного судна укладывается в интервал между рейсами, и задержек не происходит).

Дополнительно зададим модельную параметрическую зависимость достижимых параметров ИС от стоимости ее жизненного цикла:

$$C_{ИС}(p_{max}, T_{ИС}) = k \left(\frac{1\,500}{T_{ИС}} + \frac{0,02}{1-p_{max}} \right).$$

Здесь k (в усл. ед.) имеет смысл характерных издержек на ИС в единицу времени в расчете на одно воздушное судно.

По формулам (3), (7) и (5) находим: $\bar{v}_0 = 9600$, $\bar{v}_2 = 7856$, $\bar{v}_3 = 10\,548$. В рамках разработанной модели можно считать, что эти числа содержат всю необходимую информацию об исходных матрицах Λ_{cp} , $V_{cp,\phi}$, C_ϕ и T_ϕ для оценки эффективности ИС. Точность линейного приближения хорошо подтверждается результатами имитационного моделирования (рис. 5).

Далее из выражений (8) и (9) получим зависимость эффективности ИС в долгосрочном периоде от параметров качества информационной системы $\Delta\pi_{ИС} = \Delta\pi_{ИС}(p_{max}, T_{ИС}, k)$, представленную на рис. 6.

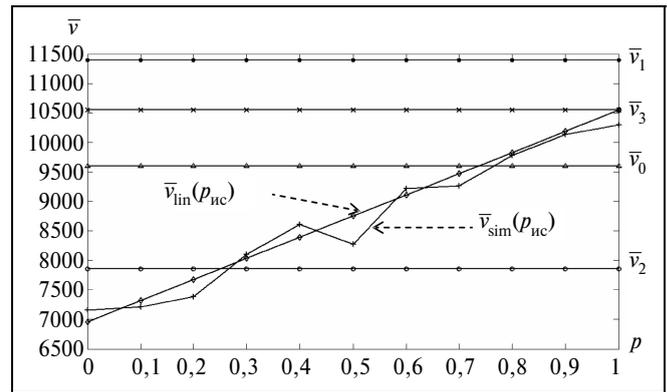


Рис. 5. Зависимость средней прибыли авиакомпании за один рейс (в краткосрочной перспективе, без учета издержек на ИС) от показателя качества ИС:

\bar{v}_{lin} — линейное приближение, \bar{v}_{sim} — результат статического моделирования; каждая точка графика получена усреднением по 100 рейсам

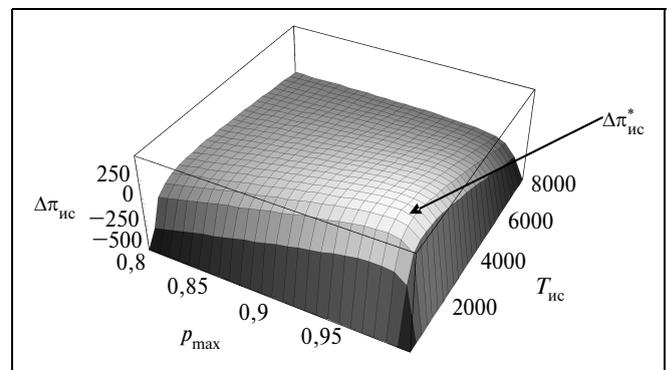


Рис. 6. Зависимость эффективности ИС в долгосрочном периоде от параметров качества информационной системы

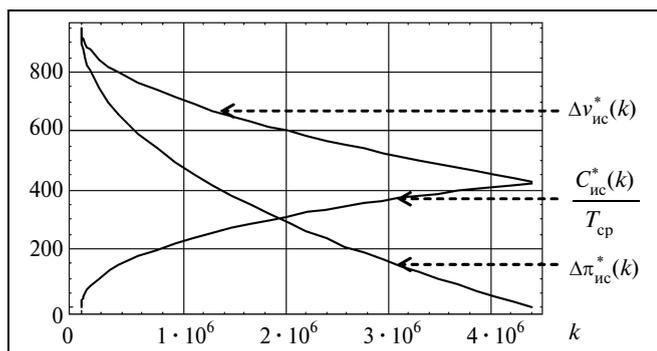


Рис. 7. Зависимость максимально достижимой прибыли авиакомпании и стоимости поддержания ИС от параметра k стоимости жизненного цикла ИС

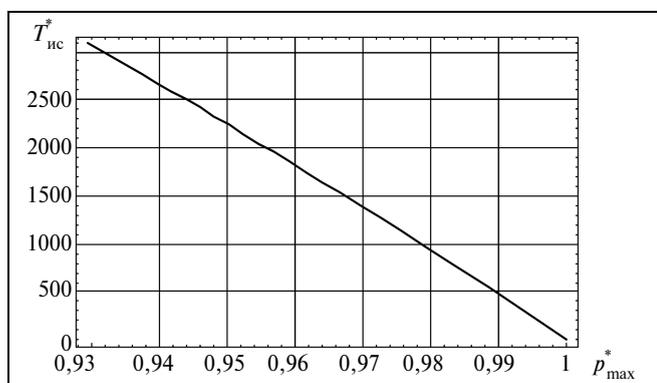


Рис. 8. Зависимость оптимального времени разработки ИС от оптимального уровня ее качества

Решение задачи оптимизации (10) дает зависимости прироста прибыли $\Delta v_{ис}^*(k)$ и издержек $C'_{ис}(k)$ авиакомпании и их разности $\Delta \pi_{ис}^*$ от стоимости жизненного цикла ИС, показанные на рис. 7.

Наконец, на рис. 8 приведена зависимость $T_{ис}^*(p_{max}^*)$ оптимальных значений проектных параметров ИС друг от друга, полученную в результате максимизации интегрального показателя эффективности ИС — прироста прибыли авиакомпании $\Delta \pi_{ис}^*$.

Характер этой зависимости обусловлен тем, что при увеличении параметра k (т. е. при удорожании ИС) становится нецелесообразным, в смысле максимизации прибыли, выбирать ИС с прежними значениями показателя качества p_{max} и времени разработки $T_{ис}$. Оптимальными будут варианты с большим временем разработки $T_{ис}$ и меньшей вероятностью верной идентификации состояния среды p_{max} , т. е. увеличение параметра k в пределах, отображенных на рис. 7, соответствует движению влево и вверх по кривой, изображенной на рис. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной фактор, определяющий экономическую эффективность систем поддержки принятия

решений, состоит в возможности кардинального повышения адаптивности фирмы в нестабильной среде. Наличие информационных систем позволяет фирме гибко менять стратегию поведения при изменениях состояния рыночного окружения фирмы, получая прирост прибыли.

В качестве показателя качества системы поддержки принятия решений целесообразно принять вероятность того, что система верно идентифицирует состояние среды и указывает оптимальную в данном состоянии стратегию фирмы. Зависимость максимально достижимого благодаря внедрению СППР прироста прибыли фирмы от показателя качества ИС приближенно можно считать линейной.

Разработанный подход к оценке эффективности и оптимизации параметров информационных систем может применяться как при определении целесообразности внедрения СППР, так и для оценки оптимального соотношения ее цены и качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключков В.В. CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. — М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. — 124 с.
2. Друкер, Питер Ф. Эффективный руководитель. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2008. — 224 с.
3. Калянов Г.Н. Консалтинг при автоматизации предприятий. — М.: СИНТЕГ, 1997. — 316 с.
4. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. — М.: Мир, 1978. — 419 с.
5. Дьяконов В.П. MATLAB 6/5 SP1/7 + Simulink 5/6®. Основы применения / Сер. «Библиотека профессионала». — М.: СОЛОН-Пресс, 2005. — 800 с.
6. Дьяконов В. Mathematica 4: учебный курс — СПб: Питер, 2001. — 656 с.
7. Арнольд В.И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. — М.: МЦНМО, 2000. — 32 с.
8. Ключков В.В., Сазонов Д.И. Методы анализа адаптивности производственных программ и организационных структур предприятий (на примере воздушного транспорта и авиационного строительства) // Экономика и математические методы. — 2007. Т. 43, № 2. — С. 44—56.
9. История экономических учений: Учеб. пособие / Под ред. В. Автономова и др. — М.: Инфра-М, 2007. — 784 с.
10. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. — М.: Сов. радио, 1977. — 488 с.
11. Стронгин Р.Г. Исследование операций. Модели экономического поведения. Учебник. — М.: Интернет-Ун-т информ. технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. — 207 с.
12. Аврин С. Жизнь «Сирены»: вчера и сегодня // Открытые системы 18.10.2001г., URL: <http://www.osp.ru/cw/2001/38/44898/> (дата обращения: 12.07.2009).

Статья представлена к публикации руководителем РРС В.Г. Заскановым.

Ключков Владислав Валерьевич — д-р экон. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎(495) 334-79-00, ✉vlad_klochkov@mail.ru.

Коломеец Александр Александрович — аспирант, Московский физико-технический институт (государственный университет), ✉alexk_1985@hotmail.com.

МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ РАЗВИТИЯ ХОЛДИНГОВОЙ КОМПАНИИ

Т.А. Горошникова, А.Д. Цвиркун

Рассмотрены вопросы управления развитием холдинговой компанией и методика оптимизации ее развития, опирающаяся на комплекс взаимосвязанных моделей различного типа (оптимизационных, имитационных, оптимизационно-имитационных). Представлены разработанные инструментальные средства для оптимизации развития холдинговой компании. Дан иллюстрирующий пример.

Ключевые слова: управление развитием, холдинговая компания, инвестиционный анализ, инвестиционные проекты, комплексная оценка, оптимизационно-имитационный подход.

ВВЕДЕНИЕ

Один из важных этапов управления холдинговой компанией заключается в планировании инвестиционной политики. Анализ прибыльности и рентабельности вложений — ключевой элемент подготовки финансовых решений, при этом особо важен предварительный анализ, который проводится на стадии разработки инвестиционных программ и способствует принятию обоснованных управленческих решений.

В настоящей работе термины «холдинг» и «холдинговая компания» употребляются как синонимы. Головная компания, центр интегрированной системы холдинга, называется управляющей компанией. Горизонтально-интегрированный холдинг — объединение однородных предприятий, представляющие собой, по сути, филиальные структуры, которыми управляет головная компания. Диверсифицированный холдинг — объединение предприятий, напрямую не связанных торговыми и производственными отношениями. Под термином «инвестиции» понимаются финансовые вложения в долгосрочные проекты, которые могут быть представлены как любые виды активов, вкладываемых в производственно-хозяйственную деятельность в целях последующего извлечения дохода. Описываемая далее методика может быть применена для выбора варианта развития как горизонтального, так и диверсифицированного холдинга.

1. ПЛАНИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ХОЛДИНГОВОЙ КОМПАНИИ

Задачи инвестиционного анализа развития холдинговой компании заключаются в обосновании целесообразности инвестиционной программы, в выборе оптимальной программы из возможных альтернатив, оценке эффективности и степени риска инвестиционной программы. Инвестиции направляются холдингом на развитие (реконструкцию, обновление технологического оборудования, освоение новых видов продукции, строительство), на финансовые инвестиции (приобретение ценных бумаг, создание дочерних предприятий).

Принятие решений по вложению инвестиций осложняется множественностью доступных вариантов вложения капитала; ограниченностью финансовых ресурсов для инвестирования; риском, связанным с принятием решения по инвестированию.

Разработка программы развития холдинговой компании включает в себя ряд предварительных этапов, связанных с анализом внешней среды, определением текущего положения компании относительно конкурентов, формированием возможных вариантов развития компании путем реконструкции и строительства новых предприятий. Процесс составления множества вариантов развития холдинга и выбор наилучшего по совокупности критериев варианта включает в себя разработку инвестиционных проектов развития отдельных предприятий холдинга; оценку эффективности



проектов независимо от других проектов; сравнительную оценку показателей эффективности проектов (оценку относительной эффективности); отбор проектов для включения в инвестиционную программу; выбор проектов, образующих варианты развития холдинга; разработку графика ввода проектов в действие и составление агрегированного денежного потока; определение объема свободных средств, остающихся в распоряжении холдинга на каждом шаге выполнения программы, и управление ими; сравнительную оценку показателей эффективности вариантов развития холдинга; выбор варианта развития холдинга.

Эффективное планирование развития холдинга невозможно без современных инструментальных средств, основанных на методах имитационного моделирования и сценарном подходе [1]. Имитационные модели позволяют «проигрывать» различные варианты развития отдельных проектов и предприятий холдинга. Моделирование развития холдинга предполагает построение комплекса взаимосвязанных оптимизационных, имитационных и расчетных моделей. Каждая модель отвечает специфическим задачам развития холдинга, а окончательное решение достигается в процессе преобразования и передачи информации между моделями на основе организации итеративных процедур их взаимодействия.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА ВАРИАНТА РАЗВИТИЯ ХОЛДИНГОВОЙ КОМПАНИИ

Экономическая эффективность инвестиционных проектов оценивается с помощью основных показателей: чистый дисконтированный (приведенный доход) NPV , внутренняя норма доходности (рентабельности) IRR , модифицированная внутренняя норма доходности (рентабельности) $MIRR$, индекс прибыльности PI , период окупаемости PB и др. [2, 3]. Выбор инвестиционных проектов холдинга базируется на сопоставлении вариантов развития холдинга в целом «с проектом» и «без проекта» (далее соответственно «основной» и «фоновый» варианты). «Основной» вариант формируется путем внесения соответствующих корректировок в показатели «фоновый» варианта. Фоновый вариант включает в себя прогноз денежных потоков по холдингу в целом с условиями, когда оцениваемый проект не будет реализован. Показатели эффективности определяются на основании денежных потоков от инвестиционной и операционной деятельности.

Предположим, что разработаны множества вариантов развития каждого предприятия. Задача состоит в выборе оптимальной комбинации этих вариан-

тов: найти значения переменных Z , $A_{ik_i}(t)$, $K_{ik_i}^+(t)$ и $K_{ik_i}^-(t)$, обеспечивающие экстремум выбранному критерию $F(Z, A_{ik_i}(t), K_{ik_i}^+(t), K_{ik_i}^-(t)) \rightarrow \text{extr}$, при выполнении множества аналитически и алгоритмически задаваемых ограничений и условий, где $Z = \{Z_{ik_i}\}$, $Z_{ik_i} = 1$, если для i -го предприятия реализуется k -й вариант, $Z_{ik_i} = 0$, в противном случае; $A_{ik_i}(t)$ — собственные средства i -го предприятия при реализации k -варианта; $K_{ik_i}^+(t)$ и $K_{ik_i}^-(t)$ — объемы соответственно привлечения и погашения заемных средств финансирования k -го варианта i -го предприятия; $i = \overline{1, I}$ — индекс предприятия; $k = \overline{1, K_i}$ — индекс варианта развития i -го предприятия; K_i — число вариантов развития предприятия; t — дискретное время.

Вариант развития холдинга формируется из независимых проектов предприятий, для которых, при рассматриваемых условиях, принятие или отказ от одного из них никак не влияет на возможность или целесообразность принятия других и на их эффективность.

В качестве критериев выбора вариантов $F(\cdot)$ могут выступать как общепринятые показатели экономической эффективности, такие как

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_i} NPV_{ik_i} Z_{ik_i} \rightarrow \max,$$

NPV_{ik_i} — чистый дисконтированный доход k -го варианта i -го предприятия;

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_i} PB_{ik_i} Z_{ik_i} \rightarrow \min,$$

так и разного рода временные и технологические показатели.

Множество аналитически задаваемых условий и ограничений на практике может налагаться на:

- на технологические и логические взаимосвязи и условия реализации проектов: $g_i(Z_{ikt}) \in GI(t, Z)$, $i = \overline{1, I}$, $t = \overline{1, T}$, где $GI(t, Z)$ — множество технологических и логических взаимосвязей и условий реализации в варианте развития холдинга, $g_i(Z_{ikt})$ — совокупность технологических и логических взаимосвязей и условий реализации k -го варианта i -го предприятия (временные условия, директивные ограничения);

- выбор одного варианта развития i -го предприятия:

$$\sum_{k_i=1}^{K_i} Z_{ik} = 1, \quad i = \overline{1, T};$$

- возможность привлечения внешних финансовых средств (интегральная оценка по всему временному горизонту планирования):

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{k_i=1}^{K_i} K_{ik}^+(t) \cdot Z_{ik} \leq \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{k_i=1}^{K_i} A_{ik}(t) \cdot Z_{ik} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{k_i=1}^{K_i} (R_{ik}(t) - C_{ik}(t)) \cdot Z_{ik}, \quad t = \overline{1, T},$$

где $(R_{ik_i}(t) - C_{ik_i}(t))$ сальдо потоков денежных средств i -го предприятия при реализации k -варианта, $R_{ik}(t)$ — доходы в период t , $C_{ik}(t)$ — расходы в период t ;

- возможности финансирования из собственных средств:

для каждого временного периода $\forall t = \overline{1, T}$:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k_i=1}^{K_i} A_{ik}(t) \cdot Z_{ik} \leq S, \quad \text{где } S \text{ — предельный уровень привлечения собственных средств в период } t.$$

В множество алгоритмически задаваемых ограничений обычно входят:

- условие обеспечения финансовой реализуемости программы:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k_i=1}^{K_i} \sum_{\tau=1}^t CF(R_{ik_i}(t) - C_{ik_i}(t), Z_{ik_i}, K_{ik_i}^-(t),$$

$K_{ik_i}^+(t), A_{ik_i}(t)) > 0$ — накопленное сальдо потоков денежных средств за t периодов и $CF_t > 0$, где $CF_t =$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k_i=1}^{K_i} (R_{ik}(t) - C_{ik}(t)) + f_1(\cdot) - f_2(\cdot) + A_{ik}(t) +$$

$+ K_{ik}^+(t) - K_{ik}^-(t) - f_0(\cdot)$ — сальдо потоков по операционной, инвестиционной и финансовой деятельности за период t . В это выражение включаются алгоритмически задаваемые функции связанными с особенностями учета обслуживания заемных средств:

$f_0(p_n, p, D, K_{ik}^+)$ — функция расчета процентов по кредитам, где p ставка процента по кредитам, p_n — ставка налога на прибыль, $f_1(p_n, f_0(\cdot))$ — функция амортизации капитализированных процентов, $f_2(p_n, \lambda, Am(t))$ — функция уплаты налога на

имущество, где λ — ставка налога на имущество, $Am(t)$ — остаточная стоимость капитализированных процентов в период t .

- требования к соблюдению условий привлечения, погашения и обслуживания внешних финансовых средств: $gD(K^+(t), D, K^-(t)) < 0$, где D — функция долга, определяемая схемой привлечения, погашения и обслуживания заемных средств, $gD(\cdot)$ — совокупность требований к реализации схемы финансирования, например, согласованность объемов привлечения, погашения и обслуживания внешних средств, директивные требования погашения кредитов, в том числе зависящие от сроков завершения программы, граничные условия на размер долга;
- требования к значениям финансовых и экономических показателей эффективности программы, формируемых на основе потока платежей по операционной, инвестиционной и финансовой деятельности.

Проекты предприятий холдинга могут быть не только независимыми, но и взаимоисключающими, взаимодополняющими или взаимовлияющими. Проекты называются *взаимоисключающими (альтернативными)*, если осуществление одного из них делает невозможным или нецелесообразным осуществление остальных. Проекты называются *взаимодополняющими*, если они могут быть приняты или отвергнуты одновременно. Взаимодополняющие проекты необходимо предварительно объединить в один проект. Проекты называются *взаимовлияющими*, если при их совместной реализации возникают дополнительные (системные) позитивные или негативные эффекты, не проявляющиеся при реализации каждого из проектов в отдельности и, следовательно, не отраженные в показателях их эффективности. Выбор варианта развития холдинга в этом случае усложняется появлением дополнительных условий и ограничений.

Варианты развития холдинга являются альтернативными.

Показатель PI может использоваться в качестве критериального, если рассматриваемые варианты развития предприятий делимы, т. е. каждый из них можно реализовать не только целиком, но и его часть.

Использование показателя IRR в качестве критериального возможно в холдингах горизонтального типа.

Практическое решение описанной задачи формирования программы развития холдинга в виде единой задачи математического программирования с непрерывными и целочисленными переменными (которые отражают финансовые потоки, факт начала реализации отдельного проекта, технологические и финансово-экономические связи) затруднено. Основная проблема состоит в наличии



алгоритмически задаваемых условий, не поддающихся описанию посредством аналитических функций и не позволяющих решать задачу с помощью только оптимизационной модели. Решение задач может быть получено на основе построения комплексов взаимосвязанных оптимизационных, имитационных и расчетных моделей и процедур по формированию, выбору и согласованию плановых решений.

3. МЕТОДИКА ВЫБОРА ВАРИАНТА РАЗВИТИЯ ХОЛДИНГОВОЙ КОМПАНИИ

На исходном множестве I вариантов развития холдинга, элементы i которого характеризуются технологическими x_i и финансово-экономическими y_i показателями, необходимо выбрать подмножество \tilde{I} , удовлетворяющее заданной системе ограничений S [3]:

$$[x_i, y_i, i \in I] \xrightarrow{\mu} [x_i, y_i, i \in \tilde{I} \subseteq I, S(\tilde{I}) \in S],$$

$$y_i = \{V_i, NPV_i, IRR_i, PB_i, \phi(\tilde{T})\}.$$

Здесь μ — некоторое правило выбора, на основе которого множество I сужают до подмножества \tilde{I} , используя интегральные показатели NPV , IRR ($MIRR$) с учетом объема инвестиций V_i , очередности и этапности реализации вариантов развития холдинга схемы финансирования $\phi(T)$, результатов финансово-экономического анализа и оценки эффективности по показателям.

Процедура анализа эффективности вариантов развития холдинга состоит из трех этапов. На первом этапе оцененные варианты развития холдинга сравниваются по показателям эффективности NPV , IRR ($MIRR$) и периоду окупаемости. Показатель NPV характеризует прирост стоимости холдинга при реализации данного варианта по сравнению с фоновым. По этому показателю лучшим считается вариант, дающий максимальное значение показателя NPV : $NPV_i \rightarrow \max$. Аналогично, по показателю IRR лучшим считается вариант, дающий максимальное значение этого показателя, а по периоду окупаемости — минимальное значение: $IRR_i \rightarrow \max$, $PB_i \rightarrow \min$.

На втором этапе варианты сравниваются не только на основе числовых характеристик, но и на основе ряда качественных оценок, таких, например, как «соответствие варианта стратегии развития компании» или «уровень риска», связанных с реализацией оцениваемого варианта. Оценки по этим критериям позволяют составить общее пред-

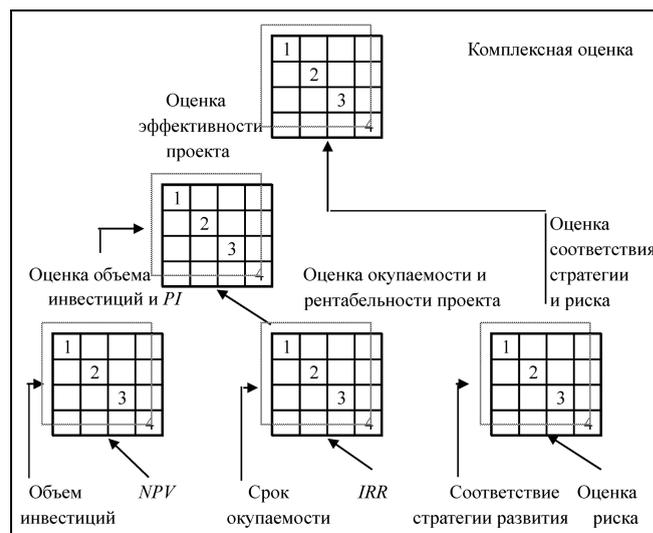


Рис. 1. Схема агрегирования критериев в комплексную оценку варианта холдинга

ставление о недостатках и преимуществах проекта. Система критериев (числовых и качественных оценок вариантов) имеет иерархическую структуру, а агрегирование проводится на основе логических матриц (рис. 1). В основе данного сравнительного анализа вариантов развития холдинга лежит метод анализа иерархий Т. Саати [4], обеспечивающий формальную обработку суждений и предпочтений экспертов на основе анализа попарных предпочтений по каждому из показателей.

В соответствии с комплексной оценкой варианты развития холдинга относятся к одной из четырех групп: реализовать проект в кратчайшие сроки и обеспечить его финансирование; реализовать проект при наличии средств для его финансирования; проект требует дополнительного анализа и доработки и может быть реализован в будущем; необходимо отказаться от проекта.

На последнем этапе анализа и выбора рассматриваются те варианты, которые попали в первые две группы. К выбранному набору показателей добавляются показатели «объем привлекаемого кредита» и «неиспользованный залог». Последний показатель характеризует возможность холдинга привлекать в случае необходимости дополнительные кредитные ресурсы. Чем больше показатель «неиспользованный залог» тем холдинг при прочих равных условиях обладает большей финансовой устойчивостью.

Этапы сравнительного анализа позволяют выбрать из множества вариантов развития холдинга один наилучший проект или некоторую совокупность проектов.

4. РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ХОЛДИНГОВОЙ КОМПАНИИ

Подбор программного обеспечения индивидуален для каждой холдинговой компании. В одних компаниях устанавливается единая информационная система одного производителя, в других отдельные программные продукты специалистов разных отделов пытаются сочетать путем интеграции. В холдингах, состоящих из разнородных предприятий, иногда устанавливаются несколько систем, позволяющих осуществлять планирование и управление бизнесом, различной функциональной мощности. Основной принцип сочетания систем в рамках этого решения состоит в том, что конкретному предприятию выбирается оптимальное решение, соответствующее его производственной деятельности, масштабу и потребностям, а наиболее эффективным решением является выделение типовых дочерних предприятий и выбор для каждого типа одного стандартного решения.

Назначение компьютерных программ развития холдинговой компании — финансовое планирование и моделирование деятельности холдинга. Программа должна анализировать эффективность и выбор управленческих решений, помогать при выборе оптимальных стратегических планов развития предприятий компании, осуществлять совместный анализ вариантов развития предприятий и инвестиционных проектов, оценивать стоимость компании и целесообразность привлечения кредитов для своевременного принятия решения о начале и прекращении финансирования проектов.

Для сформированных вариантов развития холдинга выполняется анализ консолидированного бюджета, выбирается схема его финансирования и проводится сравнение вариантов и оценка их показателей с помощью методов дисконтирования денежных потоков. Программа развития холдинговой компании помогает руководству выбрать эффективные варианты развития холдинга и служит удобным инструментом оценки вариантов развития с использованием числовых и качественных оценок и графического анализа.

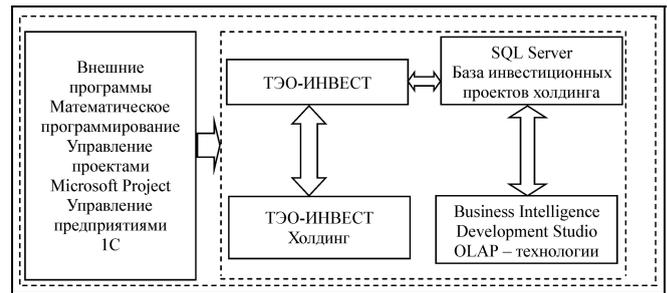


Рис. 2. Комплексная система анализа финансового состояния холдинга

Для анализа программ развития холдинговой компании в ИПУ РАН разработан программный комплекс ТЭО-ИНВЕСТ Холдинг [5, 6] — открытый программный продукт с гибко настраиваемой структурой табличных форм и графиков. В его состав входят: консолидирующая программа и собственно программный продукт ТЭО-ИНВЕСТ [2, 7] рекомендованный для разработки бизнес-планов инвестиционных проектов «Методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов», утвержденными Правительством РФ (Постановление № ВК477 от 21.06.1999 г.). Работает в среде Microsoft Excel 2003 и выше. Универсальность программы достигается работой с бюджетами предприятий и инвестиционных проектов, сформированными в любом формате. Совместимость обеспечивается функцией преобразования данных в XML формат.

Для ведения базы инвестиционных проектов холдинга разработана система ТЭО-ИНВЕСТ-Холдинг-OLAP класса Business Intelligence. Системы этого класса обеспечивают поддержку исследования информации и позволяют улучшить процесс принятия решений с помощью приложений (хранилище данных, средства OLAP) и подхода Data Mining — выявление скрытых взаимосвязей между переменными в больших массивах необработанных данных (рис. 2).

Разработанная методика использована в ходе реструктуризации нефтеперерабатывающей хол-

Таблица 1

Варианты развития холдинга

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| МК | | | | | | | | |
| НПЗ 1 | | | | | | | | |
| — | НПЗ 2 Проект 1 | НПЗ 2 Проект 2 | НПЗ 2 Проект 1 | НПЗ 2 Проект 1 | НПЗ 2 Проект 1 | НПЗ 2 Проект 2 | НПЗ 2 Проект 2 | НПЗ 2 Проект 2 |
| — | — | — | НПЗ 3 Проект 1 | НПЗ 3 Проект 2 | НПЗ 3 Проект 3 | НПЗ 3 Проект 1 | НПЗ 3 Проект 2 | НПЗ 3 Проект 3 |



динговой компании [8] и при решении задачи выбора варианта развития многопрофильного холдинга [9].

Задача формирования и финансового анализа варианта развития нефтеперерабатывающего холдинга. К числу основных объектов рассматриваемого холдинга относятся три нефтеперерабатывающих завода — действующий (НПЗ 1), находящийся в стадии строительства (НПЗ 2), находящийся в стадии проектирования и согласования (НПЗ 3) и металлургический комбинат (МК), находящийся в стадии строительства.

Исходное множество состояло из семи проектов предприятий, из которых сформировано девять вариантов развития холдинга (табл. 1) (отличающихся объемом инвестиций, моментом начала строительства, сроками строительства, местом расположения объектов).

Содержательно задача заключалась в следующем: на исходном множестве проектов необходимо сформировать вариант развития холдинга,

Таблица 2

Показатели эффективности вариантов холдинга

| Номер варианта холдинга | Разница объемов инвестиций сравниваемых вариантов, млн. руб. | Срок окупаемости, мес | NPV, млн. руб. | MIRR, % |
|-------------------------|--|-----------------------|----------------|---------|
| 7 | 5376 | 29,79 | 11 514,13 | 16,2 |
| 4 | 6485,5 | 32,42 | 10 872,74 | 16,7 |
| 8 | 5376 | 44,82 | 8 628,48 | 16,4 |
| 9 | 5376 | 44,82 | 8 628,48 | 16,4 |
| 5 | 6485,5 | 44,71 | 7 987,09 | 16,8 |
| 6 | 6485,5 | 44,71 | 7 087,09 | 16,8 |
| 3 | 1888 | Нет | 5 716,55 | 18,7 |
| 2 | 2997,5 | Нет | 5 075,15 | 20,8 |

Таблица 3

Показатели эффективности вариантов холдинга (с синергетическим эффектом)

| Номер варианта холдинга | Разница объемов инвестиций сравниваемых вариантов, млн. руб. | Срок окупаемости, мес | NPV, млн. руб. | IRR, % |
|-------------------------|--|-----------------------|----------------|--------|
| 7 | 5376 | 32,96 | 11 807,16 | 58,74 |
| 4 | 6485,5 | 30,56 | 11 061,67 | 66,21 |
| 8 | 5376 | 48,26 | 9 051,23 | 48,20 |
| 9 | 5376 | 48,26 | 9 051,23 | 48,20 |
| 5 | 6485,5 | 46,3 | 8 303,35 | 54,58 |
| 6 | 6485,5 | 46,3 | 8 303,35 | 54,58 |
| 3 | 1888 | 32,72 | 6 017,31 | 53,6 |
| 2 | 2997,5 | 25,96 | 5 269,42 | 66,6 |

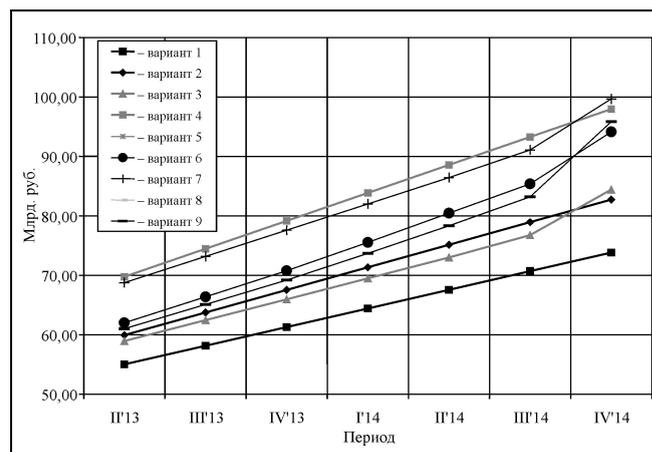


Рис. 3. Дисконтированный накопленный денежный поток холдинга (без синергетического эффекта)

обеспечивающий максимальный чистый дисконтированный доход и удовлетворяющий ряду требований, обусловленных взаимосвязями между проектами, структурой и динамикой денежных потоков, возможностями инвестирования. К числу основных требований относятся: отдельные объекты должны быть введены в эксплуатацию в указанный интервал времени; планируемый момент начала эксплуатации НПЗ 2 и НПЗ 3 должен наступать не ранее момента окончания строительства; объем финансирования из собственных средств не должен превышать заданного; должны быть выбраны варианты строительства НПЗ, его местоположения и организации транспортных потоков и др.

Задача решалась двумя способами, отличающимися подбором схемы финансирования. В соответствии с первым из них необходимая потребность в дополнительном финансировании определялась на предварительном этапе разработки проектов предприятий, т. е. у компании было несколько кредитов, взятых под конкретное предприятие. В имитационной модели вариантов холдинга схемы привлечения и обслуживания долга отсутствовали. Решение задачи на последующих этапах заключалось в выборе наиболее предпочтительного, по совокупности критериев, варианта из множества вариантов развития холдинга. Эффективность варианта развития холдинга оценивалась набором показателей (табл. 2). Вариант 1 — фоновый вариант.

Далее варианты сравнивались на основе качественных оценок, таких как «соответствие варианта стратегии развития компании» и «уровень рыночных или иных рисков, связанных с реализацией оцениваемого варианта». В результате было составлено общее представление о недостатках и преимуществах вариантов развития холдинга.

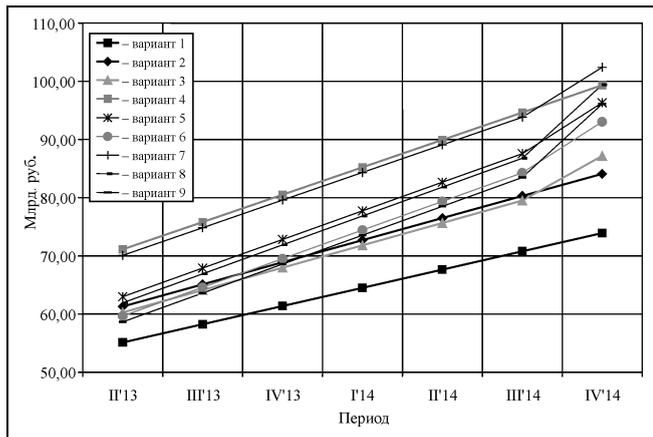


Рис. 4. Дисконтированный накопленный денежный поток холдинга (с синергетическим эффектом)

В соответствии со вторым способом — в имитационных моделях проектов отдельных предприятий при анализе не учитывалась потребность в дополнительном финансировании, поэтому при формировании варианта развития холдинга в некоторых периодах денежный поток был отрицателен. Соответствующая схема привлечения денежных средств и обслуживания долга определялась на уровне холдинга. Структура вариантов не изменялась. Различия в показателях эффективности (см. табл. 2 и 3) и в размерах накопленного денежного потока (рис. 3 и 4) объясняется синергетическим (интеграционным) эффектом от объединения проектов предприятий. Под синергией понимают разные эффекты. В общем смысле — это или уменьшение издержек, или увеличение доли рынка. В данном же случае синергетический эффект достигается за счет оптимизации использования денежных ресурсов по периодам. Нехватка денежных средств на одном предприятии компенсируется прибылью другого. Суммарный кредит оказывается меньше, чем сумма кредитов предприятий. Синергию можно измерить количественно, в данном примере она определяется как прирост показателя эффективности варианта при переходе от реализации кредита предприятия вне холдинга к реализации кредита в составе холдинга.

Итоги расчетов двумя способами позволили экспертам «рекомендовать» руководителю компании выбрать один и тот же вариант развития холдинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена в рамках разработки моделей управления развитием крупномасштабных производственно-транспортных систем на основе построения оптимизационно-имитационных моделей объектов управления.

Полученные результаты могут быть использованы в различных отраслях при решении задач выбора и оптимизации стратегических решений и инвестиционных программ развития крупномасштабных производственно-транспортных систем и полезны для решения задач моделирования развития сложных производственно-транспортных систем, имеющих важное народнохозяйственное значение, что позволит улучшить их технико-экономические и тактико-технические характеристики создания и функционирования.

В дальнейшем представляет интерес разработка инструментальных средств управления развитием крупномасштабных систем на основе декомпозиции систем и задач управления с использованием моделей различного типа в человеко-машинных процедурах принятия решений с учетом факторов неопределенности и рыночных рисков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цвиркун А.Д. Управление развитием крупномасштабных систем в новых условиях // Проблемы управления. — 2003. — № 1. — С. 34—43.
2. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К. Анализ инвестиций и бизнес-планы. — М.: Ось-89, 2002.
3. Карибский А.В., Шишорин Ю.Р., Юрченко С.С. Финансово-экономический анализ и оценка эффективности инвестиционных проектов и программ // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 6, 8.
4. Saaty T.L. Concepts, Theory and Techniques. Rank generation, preservation, and reversal in the analytic hierarchy decision process // Decision Sci. — 1987. — Vol. 18. — P. 157—176.
5. Система стратегического управления холдинговой компанией ТЭО-Инвест Холдинг // Проблемы управления. — 2006. — № 5. — 2006. — С. 99.
6. Горошников Т.А., Цвиркун А.Д. Разработка моделей и инструментальных средств оптимизации развития холдинговой компании. — М.: ИПУ РАН, 2007.
7. Программный комплекс ТЭО-ИНВЕСТ // Проблемы управления. — 2006. — № 6. — С. 101.
8. Горошников Т.А., Шувалов К.И. Имитационные модели для оценки эффективности и рисков инвестиционных программ в ВИНК // Материалы второй междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2008. — М.: ИПУ РАН, 2008. — Т. 1. — С. 146—149.
9. Горошников Т.А., Нюдюрбегов А.Н. Использование программного комплекса ТЭО-Инвест Холдинг для анализа эффективности развития многопрофильных холдингов. Материалы IV Междунар. конф. по проблемам управления (МКПУ-IV). — М., 2009. С. 1164—1172.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Горошников Татьяна Аркадьевна — науч. сотрудник,
☎(495) 334-90-50, ✉tagora@list.ru,

Цвиркун Анатолий Данилович — д-р техн. наук,
зав. лабораторией, ☎(495) 334-78-29, ✉tsvirkun@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.



ОЦЕНКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПАНИЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АДАПТАЦИОННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ К ВНЕШНЕЙ СРЕДЕ

С.Н. Масаев, М.Г. Доррер

Предложен подход к анализу структуры и числовых характеристик производственной системы, основанный на расчете линейной корреляции между временными рядами затрат.

Ключевые слова: корреляция, адаптометрия, процесс, системный анализ, управление.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня в условиях мирового кризиса для бизнеса характерно усиление процессов интеграции, в результате которых появляется целая серия объединений, слияний и поглощений. Холдинговые компании, как продукт этих процессов, возникают по всему миру, включая Россию. На роль основных двигателей отечественного бизнеса претендуют финансовые группы, которым удалось диверсифицировать сферы деятельности и наладить взаимодействие производственных систем внутри групп. В настоящее время этот процесс все еще усиливается: большинство крупных производственных систем находятся в сфере влияния той или иной группы. Однако далеко не завершен другой процесс — выстраивание модели управления производственной системой внутри холдинга, позволяющей считать российские холдинги не просто собранием разнородных активов, а по-настоящему работоспособными системами [1].

При управлении компаниями холдинга управленца подстерегают следующие проблемы:

- субъективность и недостаточная точность анализа структуры действующих взаимоотношений с другими производственными системами в холдинге;
- недостаточная связь между учетными системами производственной системы и системами планирования и прогнозирования, затрудняющая и снижающая точность оценки последствий принимаемых управленческих решений [2];
- недостаточная прозрачность имеющихся систем планирования и прогнозирования работы

производственных систем, снижающая уровень принимаемых управленческих решений [3];

- разновекторность развития компаний в холдинге, наличие не выявленных конфликтующих целей [4].

Одним из оригинальных подходов, позволяющих решать указанные проблемы и строить интегральные оценки динамики производственных систем и их адаптации к условиям изменяющейся конкурентной среды, может стать метод корреляционной адаптометрии, предложенный А.Н. Горбанем и Е.В. Смирновой в 1985 г. для анализа биологических систем. Установлено, что динамика скоррелированности параметров биологических систем в условиях стрессовых ситуаций может служить показателем реакции на стресс и способность системы к адаптации [5].

Предложенный подход можно применить для анализа параметров производственных систем. Для этого необходимо:

- выполнить анализ поведения производственной системы в условиях кризисных явлений на основе методов корреляционной адаптометрии;
- осуществить распределение ресурса (в частном случае финансирования) в производственной системе.

1. АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ КРИЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ АДАПТОМЕТРИИ

Производственной системой в данной статье будем считать компанию в целом.

В соответствии с классической теорией систем управления (Р. Калман и др., 1971) рассматриваем

мую систему S можно представить в виде $S = \{T, X\}$ где $T = \{t = 0, 1, 2, \dots\}$ — дискретное множество моментов времени (моменты учета системы); X — фазовое пространство системы, $x(t) = [x^1(t), x^2(t), \dots, x^n(t)]^T \in X$ — n -мерный вектор фазовых переменных, определяющих состояние системы.

В качестве фазовых переменных системы $x^j(t)$ выступают финансовые затраты на выполнение определенных функций. Пример представления этих функций в системе бухгалтерского учета (бюджетирования) приведен в табл. 1. Полный список фазовых переменных в данном исследовании содержит 417 наименований, т. е. $n = 417$.

Для анализа используются значения вектора фазовых переменных $x(t)$ за k предыдущих тактов. Параметр k будем называть глубиной анализа (в работе принято $k = 6$ мес).

Получим матрицу

$$X_k(t) = \begin{bmatrix} x^T(t-1) \\ x^T(t-2) \\ \dots \\ x^T(t-k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^1(t-1) & x^2(t-1) & \dots & x^n(t-1) \\ x^1(t-2) & x^2(t-2) & \dots & x^n(t-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x^1(t-k) & x^2(t-k) & \dots & x^n(t-k) \end{bmatrix}$$

Далее произведем центрирование и нормирование ее элементов и обозначим

$$\begin{aligned} \dot{X}_k(t) &= \begin{bmatrix} \dot{x}^T(t-1) \\ \dot{x}^T(t-2) \\ \dots \\ \dot{x}^T(t-k) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \dot{x}^1(t-1) & \dot{x}^2(t-1) & \dots & \dot{x}^n(t-1) \\ \dot{x}^1(t-2) & \dot{x}^2(t-2) & \dots & \dot{x}^n(t-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{x}^1(t-k) & \dot{x}^2(t-k) & \dots & \dot{x}^n(t-k) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_k^T(t) &= [\dot{x}(t-1) \ \dot{x}(t-2) \ \dots \ \dot{x}(t-k)] = \\ &= \begin{bmatrix} \dot{x}^1(t-1) & \dot{x}^1(t-2) & \dots & \dot{x}^1(t-k) \\ \dot{x}^2(t-1) & \dot{x}^2(t-2) & \dots & \dot{x}^2(t-k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{x}^n(t-1) & \dot{x}^n(t-2) & \dots & \dot{x}^n(t-k) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

и вычислим $R_k(t) = \frac{1}{k-1} \dot{X}_k(t) \dot{X}_k^T(t) = \|r_{ij}(t)\|$, $i, j = 1, \dots, n$, где $r_{ij}(t) = \frac{1}{k-1} \sum_{l=1}^k \dot{x}^i(t-l) \dot{x}^j(t-l)$ — коэффициент корреляции.

Следует учесть, что оценка t -критерия для пары x^i и x^j вычисляется по формуле

$$t = \frac{|r_{ij}|}{S_\tau}, \quad S_\tau = \frac{1 - \tau_{ij}^2}{\sqrt{k-2}}.$$

Эта величина сравнивается с табличным значением критерия Стьюдента t_α для $k-2$ степеней свободы при доверительной вероятности α . В инженерных расчетах обычно берется $\alpha = 0,95$.

Если при анализе системы получена величина $t \geq t_\alpha$, то гипотеза о наличии значимой линейной связи между переменными $x^i(t)$ и $x^j(t)$ не отвергается, при $t < t_\alpha$ — отвергается. Поскольку величина t определяется коэффициентом корреляции r_{ij} и числом k , то для каждого табличного значения t_α существует предельное (критическое) значение $r_{кр}$. При этом соотношение $|r_{ij}| \geq r_{кр}$ равносильно соотношению $t \geq t_\alpha$, а $|r_{ij}| < r_{кр}$ соответствует $t < t_\alpha$.

С другой стороны, если $|r_{ij}|$ близок к единице, то это говорит о функциональной линейной зависимости переменных $x^i(t)$ и $x^j(t)$. Таким образом, глубина анализа была выбрана минимально воз-

Таблица 1

Бюджет доходов и расходов с привязкой к функциям производственной системы

| Проект | Вид деятельности | Статья дохода/расхода | Подстатья дохода/расхода | Выполняемая функция (фазовая переменная x^j) | План $x^{*j}(t)$ | Факт $x^j(t)$ |
|----------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------------------|---|------------------|---------------|
| Наименование проекта | Капитальные вложения | Проектирование | Проектирование | Проектирование внешних сетей x^1 | $x^{*1}(t)$ | $x^1(t)$ |
| Текущая деятельность | Финансовая | Использование прибыли | Прибыли и убытки прошлых лет | Инвентаризация x^2 | $x^{*2}(t)$ | $x^2(t)$ |
| Текущая деятельность | Операционная | Услуги сторонних организаций | Прочие услуги сторонних организаций | Прочие расходы x^3 | $x^{*3}(t)$ | $x^3(t)$ |

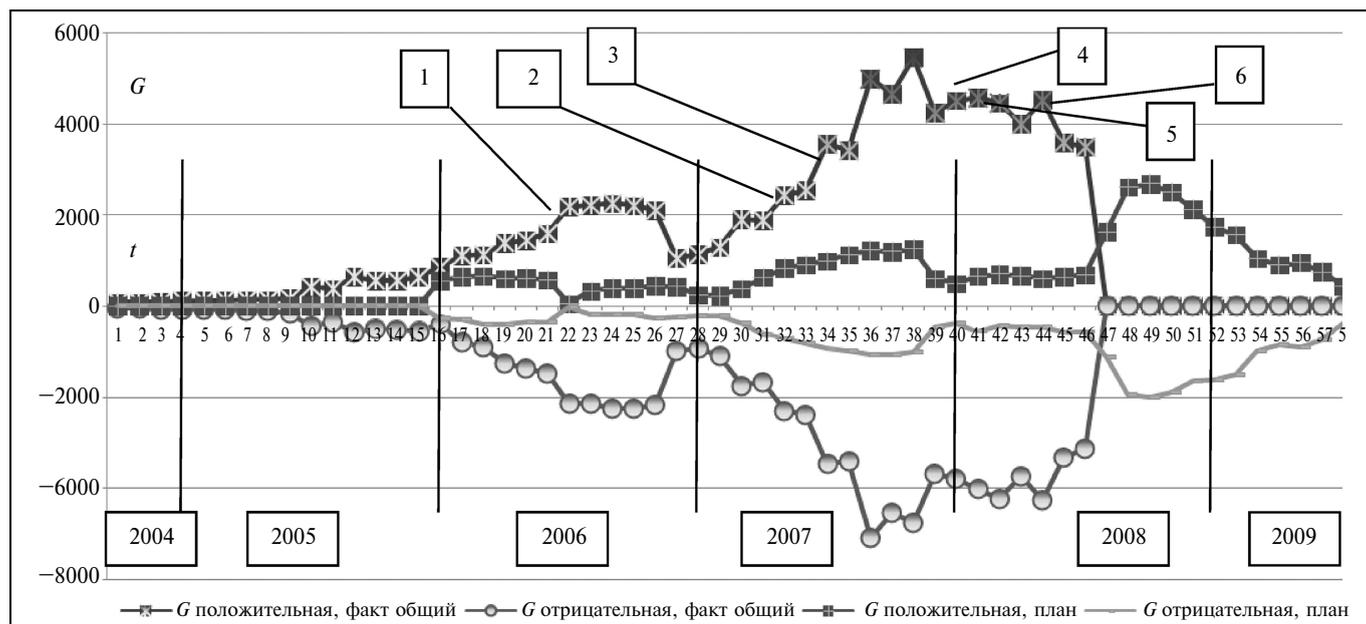


Рис. 1. График реакции производственной системы на события внешней среды и внутренние работы, выраженной через числовые характеристики корреляционных матриц

можно для получения результатов анализа, достаточно достоверных для инженерных задач. Минимально возможное значение k было выбрано из соображений снижения трудоемкости расчетов, снижения требований к объему экспериментальной выборки, а также исходя из необходимости снизить влияние на результаты эксперимента изменчивости системы на длительных временных интервалах.

Исходя из сказанного проводится корректировка массива исходных данных (13) и соответственно корреляционных матриц $R_k(t)$ для всех $t \in T$.

На основе корреляционных матриц $R_k(t)$ строятся корреляционные графы системы, наглядно отображающие взаимосвязи между параметрами системы (см. далее рис. 2).

Корреляционную матрицу $R_k(t)$ фазовых переменных мы и будем рассматривать в качестве функции наблюдателя:

$$v^-(x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-k)) = R_k(t)$$

или

$$v^+(x(t+1), x(t+2), \dots, x(t+k)) = R_k(t).$$

Данная функция наблюдателя может служить интегральной оценкой динамики системы, она дает возможность анализировать поведение многомерной системы, отслеживая возникшие тенденции изменения взаимодействий функций между

собой за прошлые моменты времени, вызванные управлением или внешним воздействием.

Для дальнейшего анализа, следуя методу корреляционной адаптометрии, выделены следующие показатели корреляционного напряжения производственной системы:

$$G_i^{\text{сумм.общ}}(t) = \sum_{j=1}^n |r_{ij}(t)| : (|r_{ij}(t)| \geq r_{\text{кр}})$$

— сумма абсолютных значений коэффициентов корреляции i -й функции с прочими;

$$G_i^{\text{сумм.пол}}(t) = \sum_{j=1}^n r_{ij}(t) : (|r_{ij}(t)| \geq r_{\text{кр}}) \cap (r_{ij}(t) > 0)$$

— сумма положительных значений коэффициентов корреляции;

$$G_i^{\text{сумм.отр}}(t) = \sum_{j=1}^n r_{ij}(t) : (|r_{ij}(t)| \geq r_{\text{кр}}) \cap (r_{ij}(t) < 0)$$

— сумма отрицательных значений;

$$G_i^{\text{разн}}(t) = G_i^{\text{сумм.пол}}(t) + G_i^{\text{сумм.отр}}(t)$$

— сумма значений коэффициентов корреляции, взятых с учетом знаков, где $r_{\text{кр}}$ — критическое значение коэффициента корреляции при данной выборке с глубиной анализа k . Графики изменения этих показателей во времени показаны на рис. 1.

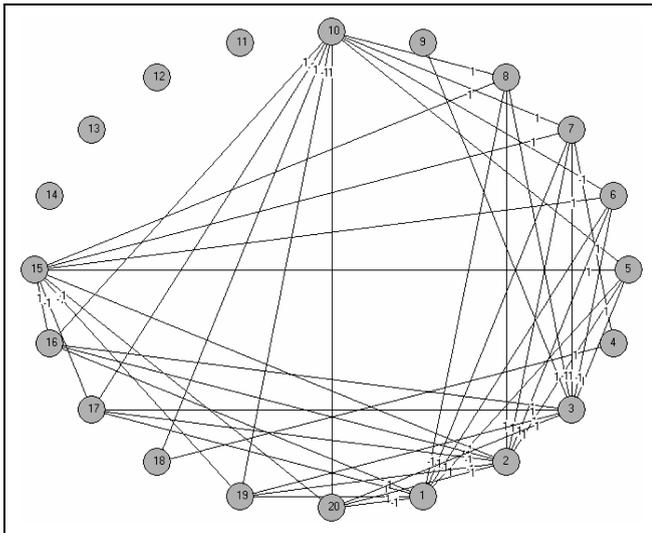


Рис. 2. Корреляционный граф производственной системы (включены только значимые связи); $G_{i=20}^{\text{разн}} (t = 38)$

Все четыре значения $G_i(t)$ рассчитываются на заданном временном интервале T на основе фактических и плановых фазовых переменных функций (см. табл. 1) и характеризуют связность каждой функции в корреляционном графе (рис. 2).

Были рассчитаны коэффициенты корреляции и элементы корреляционных матриц на основе данных из анализа бюджета доходов и расходов компаний.

Также удалось спрогнозировать основные стрессовые ситуации производственной системы на период с 15 по 44 мес функционирования, а главное, кризис 2008 г.

На рис. 1 приведены основные важные события в производственной системе: 1 — создание рабочей документации (расчет плановых смет строительства); 2 — получение разрешения на строительство — документа, разрешающего выполнять строительные работы (получение разрешения на строительство — наиболее важное событие, которое позволяет начать строительные работы); система испытывает среднюю нагрузку, большую, чем просто оформление и расчет плановых смет); 3 — внедрение системы повышения качества (работа по оформлению стандартов и правил работы производственной системы (компании); нагрузка на систему не больше, чем при формировании плановых смет); 4 — получение ресурса (привлечение основного финансирования на строительство привело систему к существенному стрессу, как и начало строительных работ); 5 — начало работ по проекту (создание уникальной про-

дукции); 6 — создание аналогичной производственной системы (привело производственную систему к наибольшему стрессу; для системы оказалось важнее создать аналогичную производственную систему, ведь шанс на успешную реализацию проекта и привлечение дополнительных ресурсов возрастает).

Отметим, что наиболее стрессовые ситуации для производственной системы — это ситуации, чаще всего связанные с внешней средой, а не с выполнением внутренних работ. Из рис. 1 видно, что наиболее стрессовые ситуации имеют высокие значения $G_i^{\text{разн}}(t)$.

Отметим, что зависимости $G_i^{\text{сумм.пол}}(t)$ и $G_i^{\text{сумм.отр}}(t)$ симметричны, различаются только их знаки. Если данной симметрии не будет, значит, исходные данные (см. табл. 1) плохо описывают исследуемую систему.

Главное преимущество разработанного алгоритма управления заключается в том, что он имеет дело с бухгалтерскими проводками и позволяет оценить, например, необходимость модернизации производственных процессов в определенном звене холдинга. К тому же алгоритм предполагает, что на протяжении рассматриваемого периода ($t = 58$) технологическая структура производства меняется. Еще не зная о проблеме и не собирая совещания, управленец может увидеть возникающие проблемы из анализа корреляционных матриц $R_k(t)$, если $G_i^{\text{разн}}(t+1) > G_i^{\text{разн}}(t)$.

Установлена взаимосвязь функций, задействованных в хозяйственной деятельности производственной системы (см. рис. 2 и табл. 2).

В рамках заданного периода от изучения общего корреляционного рейтинга можно перейти на уровень рассмотрения отдельных выделяемых функций отделов и департаментов компании и определить их количественное влияние на развитие производственной системы в динамике. Выполняемые функции, которые имеют наибольшую корреляционную связь с прочими $G_i^{\text{разн}}(t)$ (см. рис. 2 и табл. 2), а следовательно более прочих функций влияют на остальные, получают финансирование в первую очередь и рассматриваются наиболее тщательно для управления компанией. Аналогично финансирование распределяется на выполняемые функции. Сумму финансирования определяет сам управленец, либо ответственное за это лицо. Таким образом, более объективно решается задача распределения финансирования в компании в целях ее развития [6].



Пример распределение ресурсов (денег) по целям и задачам производственной системы на основе метода Р. Беллмана в разрезе систем и сформированного по числовым характеристикам суммарного корреляционного рейтинга представлен в табл. 3 [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в работе подход к анализу системы управления группой разнородных производственных систем (компаний) — холдингом позволяет:

Таблица 2

Расшифровка корреляционного графа $G_{i=20}^{\text{разн}}$ ($t = 38$) (включая расходы)

| Номер функции (см. рис. 2) | Доход/расход | Вид деятельности | Статья дохода/расхода | Подстатья дохода/расхода | Выполняемая функция | |
|----------------------------|--------------|---|--|---|--------------------------|--------------------------|
| 1 | Доход | Инвестиционная | Поступления и расходы от выбытия иных активов | Доходы и расходы, связанные с выбытием иных активов | Прочие доходы | |
| 2 | | | Поступления и расходы от выбытия ОС | Доходы и расходы, связанные с реализацией ОС | | |
| 3 | | Операционная | Налоги и сборы | Прочие налоги и сборы | Выплата налогов | |
| 4 | | | Прочие доходы | Прочие доходы | Прочие доходы | |
| 5 | | | Реализация работ, услуг | | Агентское вознаграждение | Агентское вознаграждение |
| 6 | | | | Реализация пропусков | Пропуски на территорию | |
| 7 | | | | Реализация прочих услуг | Прочие доходы | |
| 8 | | | | Сдача в аренду имущества | Сдача в аренду | |
| 9 | | | | Энергоресурсы и коммунальные платежи | Возмещение расходов | |
| 10 | | | Реализация товаров | | | |
| 11 | Финансовая | Использование прибыли | Результаты инвентаризации | Прочие доходы | | |
| 12 | | Курсовые разницы | | | | |
| 13 | | Нарушение условий договоров | Штрафы, пени, неустойки за нарушение условий договоров | | | |
| 14 | | Проценты по кредитам, займам, депозитам, векселям | Проценты к получению и уплате | Проценты к получению и уплате | | |
| 15 | | РКО и прочие услуги банков | РКО и прочие услуги банков | Услуги банка | | |
| 16 | | Штрафы, пени | Штрафы, пени, неустойки | | | |
| 18 | Расход | Инвестиционная | Поступления и расходы от выбытия иных активов | Доходы и расходы, связанные с выбытием иных активов | Прочие расходы | |
| 19 | | | Поступления и расходы от выбытия ОС | Доходы и расходы, связанные с реализацией ОС | | |
| 20 | | Операционная | Амортизация | Амортизация НМА | Амортизация | |

Распределение денежных ресурсов в рублях

| Проект | Функциональная система | Цель | | | | | Итого |
|---|---------------------------|--|---|---------------------------|--------------------------|---|------------|
| | | Увеличение собственного капитала (активов) на 30 % | | | | | |
| | | Конкурентная стратегия | Стратегия развития или изменения рынка или продукта | Стратегия роста | Стратегия НИОКР | Стратегия производства и его развития | |
| | | Снятие сливок | Новые продукты и рынки | Горизонтальная интеграция | Закупка новых технологий | Рационализация системы ресурсного обеспечения | |
| Влияние функциональных систем на выполнение цели холдинга | | | | | | | |
| Х | Мотивация персонала | 146 328 | 24 388 | | 78 042 | 341 432 | 590 190 |
| | Информационных технологий | 189 536 | 13 538 | 270 765 | 67 691 | 81 230 | 622 760 |
| | СМК (TQM) | 378 140 | 113 442 | 378 140 | | 756 279 | 1 626 000 |
| | Экономических расчетов | | 166 367 | 1 164 566 | | 1 996 398 | 3 327 330 |
| | Производство | | 246 647 | 493 295 | 147 988 | 2 959 769 | 3 847 700 |
| | Итого | 714 003 | 564 382 | 2 306 765 | 293 721 | 6 135 108 | 10 013 980 |

- определить критические периоды компании с помощью оценки суммарного корреляционного рейтинга числовых характеристик производственных систем, полученных на основании фактических учетных данных;
- оптимизировать затраты на выполняемые функции, более четко сориентировать производственную систему на выполнение своих целей, оптимизировать работу производственной системы в рамках холдинга;
- управлять разнородными активами холдинга благодаря стандартизации подхода к разнородным показателям подобно тому, как это делается в сбалансированных системах показателей;
- распределять ресурсы производственной системы в рамках целей, задач и функциональных подсистем.

При построении комплексной и современной системы управления компанией был применен не одномерный подход по одному показателю, а решение, направленное на интеграцию управления различными функциями деятельности предприятия. Такое решение представляет собой не только эффективный механизм управления холдингом, но и имеет реальную денежную ценность для компании. Это объясняется тем, что система выступает для инвесторов гарантом управляемости проектов данного предприятия и минимизации управленческих рисков, и наличие такой системы представляет собой ценный нематериальный актив.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Афанасьев В.Н.* Математическая теория конструирования систем управления / В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. — М.: Высшая школа, 1989.
2. *Нильс-Горан О., Рой Ж., Магнус В.* Оценка эффективности деятельности компании / Практическое руководство по использованию сбалансированной системы показателей. — М.: Вильямс, 2004. — 304 с.
3. *Дугельный А.П., Комаров В.Ф.* Бюджетное управление предприятием. — М.: Дело, 2004. — 432 с.
4. *Друри К.* Введение в управленческий и производственный учет. — М.: Аудит ЮНИТИ, 1998.
5. *Механизм повышения корреляций между физиологическими параметрами при увеличении адаптационного напряжения / А.Н. Горбань и др. // Тр. IV междунар. конф. «Математика, компьютер, образование». — Москва — Пушкино, 1997. — С. 68—73.*
6. *Флеминг У., Ришел Р.* Оптимальное управление детерминированными и стохастическими системами. — М.: Мир, 1978.
7. *Масаев С.Н., Доррер М.Г.* Методика оценки системы управления компанией на основе адаптационной корреляции к внешней среде // Вестник Сибирского гос. аэрокосм. ун-та. — 2009. — Вып. 1(22). — С. 166—170.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.М. Нижегоордцевым.

Масаев Сергей Николаевич — аспирант,
✉ fabery@rambler.ru,

Доррер Михаил Георгиевич — канд. техн. наук, доцент,
✉ mdorrrer@mail.ru,

Сибирский государственный технологический университет,
г. Красноярск.

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

А.Ф. Резчиков, В.А. Твердохлебов

Для описания взаимосвязей и взаимодействий однородных процессов, образующих производственные процессы, предложены дискретные детерминированные модели в форме причинно-следственных комплексов. Разработаны основные положения построения комплексов, новые структуры звеньев и правила композиции звеньев и комплексов. Предложен формализованный язык для представления структуры и комплекса в целом. Отмечено, что разработанные средства позволяют представлять комплексы иерархической структурой с последовательным переходом от грубого и приближенного описания производственного процесса к его представлению моделью с заданными глубиной, полнотой и точностью.

Ключевые слова: причина, следствие, условие реализации причинно-следственной связи, группа причины, группа следствия, комплекс причинно-следственных связей, дискретный процесс, взаимодействие процессов.

ВВЕДЕНИЕ

В основе производственных процессов лежат взаимодействия процессов различной природы: технологических, кадровых, процессов энергообеспечения, процессов обеспечения оборудованием технологических процессов, процессов обеспечения сырьем и комплектующими и т. п. Для построения моделей производственных процессов должны быть определены взаимосвязи и взаимодействия разнородных процессов, что требует формы моделей, допускающей представление процессов в общем виде (см., например, работы [1–10]). Разработанные модели построены на основе общих категорий причины и следствия, их развития с учетом условия реализации причинно-следственной связи и условия, получающегося после реализации связи. В работах [11, 12] изложены исходные положения построения причинно-следственных комплексов, в которых использованы новая структура как элементарных звеньев причинно-следственных связей, так и композиций элементарных звеньев. Новая предлагаемая структура модели изображена на рис. 1.

В настоящей работе рассматриваются процессы в сложном производстве, среди которых определяющими выступают технологические процессы с их представлением, ограниченном взаимосвязями и взаимодействиями следующих пяти компонентов:

- U_1 — команда (график, инструкция, стимул или желание, распоряжение и т. п.);
- U_2 — исполнитель (специалист, робот, устройство управления и т. п.);
- U_3 — оборудование;
- U_4 — энергоресурсы;
- U_5 — комплектующие, сырье и т. п.

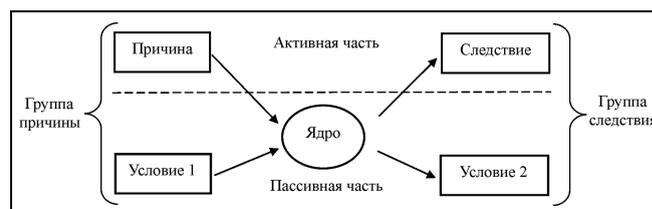


Рис. 1. Структура элементарного звена и комплекса причинно-следственных связей с разделением на группу причины и группу следствия

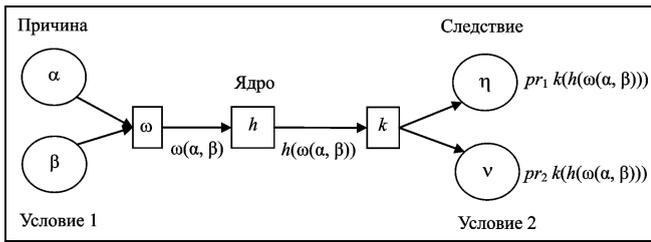


Рис. 2. Расширенная структура элементарного звена причинно-следственных связей, включающая в себя операции совмещения и расширения компонентов

Для каждого из пяти компонентов выделяется частный универсум: Ω_1 — универсум команд, Ω_2 — универсум исполнителей, Ω_3 — универсум оборудования, Ω_4 — универсум вариантов энергообеспечения и Ω_5 — универсум сырья, комплектующих и т. п. Пусть $\Omega \subset \Omega_1 \times \Omega_2 \times \Omega_3 \times \Omega_4 \times \Omega_5$ — множество компонентов, имеющих интерпретацию в области приложений.

Для производственных процессов соответствующая модель может быть только моделью кибернетического характера, т. е. содержащая математическую модель как фрагмент, содержащая представление средствами формализованного языка структуры взаимосвязей и взаимодействий компонентов процессов и банки данных, определяющие операции над используемыми однородными и разнородными компонентами. Определение операций с указанием связей аргументов и результатов операции в форме таблиц существенно. Математические средства эффективно определяют связи на основе количественно выраженных отношений, что представляет большие трудности при совмещении числовых и нечисловых аргументов.

В разработке моделей сложных производственных процессов участвуют специалисты, рассматривающие производственные процессы на различных уровнях детализации и общности в диапазоне от принципиальных характеристик производства до инженерного конструктивизма конкретных технологических операций. В связи с этим модель должна быть иерархической, что отражается в специфике структуры причинно-следственных комплексов: звенья и комплексы причинно-следственных связей имеют аналогичное строение (см. рис. 1 и далее рис. 2).

Разработанная модель ориентирована на производственные процессы, однако в силу ее формальной общности она вполне применима для моделирования сложных социально-экономических, биологических и других систем. Необходимо лишь рассматриваемые в данной работе пять типов компонентов заменить другими, соответствующими рассматриваемой области приложений.

В данной статье даны ссылки только на некоторые, существенно повлиявшие на представления авторов, работы [1–3, 5, 6, 8, 10, 13–16]. Более полный библиографический список приведен в работе [12].

1. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗВЕНЬЯ ПРИЧИНО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ

Достаточно развитые формальные и специализированные аппараты для представления взаимосвязей и взаимодействий между однородными (командно-информационными, кадровыми, энергообеспечивающими и др.) процессами, объектами и событиями, представленными в компонентах U_1, U_2, \dots, U_5 , по мнению авторов, требуют дальнейшего развития. Фундаментальные исследования построения моделей сложных систем отражены, например, в работах [1, 2, 8–10, 15]. В монографии [2] рассматриваются «физическое моделирование и математическое моделирование» (с. 42), в которых учитываются «различное физическое содержание» оригиналов, описываемое «одинаковыми математическими соотношениями». В работе [8] отмечается, что «управление большинством технологических процессов пока неосуществимо или мало эффективно без участия человека» (с. 15). Однако в списке основных понятий, с использованием которых строятся модели производственных процессов, участие исполнителя (человека) отсутствует или включается в технологические операции неявно. Управление производством «следует рассматривать как сложный исполнительный механизм многоуровневой системы» [4, с. 5]. В достаточно полном и подробном изложении связи САПР с автоматизацией производства, содержащемся в работе [4], например, информационным процессам в управлении производством уделено лишь полторы страницы (с. 495). В этой и многих других работах, посвященных построению моделей сложных производственных процессов, составляющие их однородные процессы предполагаются изолированными между собой с помощью фиксации взаимосвязей рассматриваемого процесса с другими процессами. Это означает, что в существующих подходах к построению математических моделей сложных производственных процессов такие процессы исследуются не как взаимодействующие однородные процессы (однородные командно-информационные процессы; процессы подготовки, размещения и использования исполнителей; процессы использования оборудования; процессы энергообеспечения; процессы обеспечения сырьем и комплектующими и др.), а как отдельные однородные процессы при фиксированных характеристиках остальных процессов. В ряде работ (см., например, [5]) рассматривается совме-

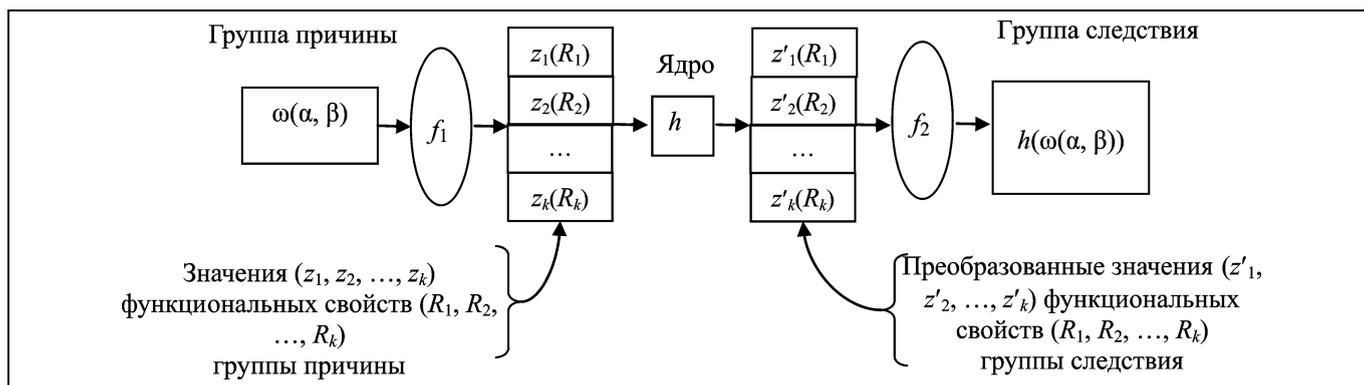


Рис. 3. Схема связи свойств пяти базовых процессов с функциональными свойствами объекта, для которого строятся звенья и комплексы причинно-следственных связей

ние некоторых однородных и конкретных технологических процессов.

В данной статье сложный производственный процесс представляется как результат взаимосвязей и взаимодействий однородных процессов, входящих в модель в явном виде, образуя модель единого и общего производственного процесса, что позволяет более глубоко и полно ставить и решать задачи управления, технического диагностирования, анализа и синтеза, оптимизации и другие в сложных системах.

Совмещение разнородных процессов в причинно-следственных категориях приводит к повышению значения таких процедур, в частности, к повышению роли вводимых операций совмещения ω и расщепления θ . Например, командно-информационный компонент элемента универсума существенно влияет на все пять компонентов результата совмещения. Такое влияние невозможно формализовать только количественными отношениями. Средством формализации операций ω и θ оказывается задание операций не только числовыми структурами, но и таблично в символьной форме (табл. 1, 2).

Элементарные звенья причинно-следственных связей рассматриваются как базовые элементы, из которых синтезируются комплексы причинно-следственных связей. Структура элементарного звена причинно-следственных связей, включающая в себя пять компонентов (причину, условие 1, следствие, условие 2, ядро) расширяется включением

в нее операций совмещения ω и расщепления k (см. рис. 2).

К причине относятся те компоненты производственного процесса, которые дополняют имеющиеся и представленные в условии 1 факторы, достаточные для получения группы следствия. На рис. 3 показано, что ядро h можно рассматривать как преобразование не набора $\omega(\alpha, \beta)$ значений пяти компонентов $U_1—U_5$, а как преобразование набора значений (z_1, z_2, \dots, z_k) функциональных свойств (R_1, R_2, \dots, R_k) группы причины в набор значений $(z'_1, z'_2, \dots, z'_k)$ этих свойств, полученный для группы следствия. В функциональных свойствах (R_1, R_2, \dots, R_k) , связанных с целевым предназначением рассматриваемого объекта, обобщены и представлены свойства однородных процессов. Функции f_1 и f_2 определяют связи свойств пяти базовых процессов с функциональными свойствами объекта. В причинно-следственных комплексах в узлах соединения элементов, а также при их совмещении в группу причины и при расщеплении группы следствия для применения последующих операций композиции формируются банки, задающие операции вида $\omega : \Omega \times \Omega \rightarrow \Omega$, $k : \Omega \rightarrow \Omega \times \Omega$. Ядро, математически описывающее преобразование группы причины в группу следствия, является отображением вида $h : \Omega \rightarrow \Omega$ (табл. 1). Понятие «сложная система» характеризуется большим числом элементов системы или сложностью их взаимодействий.

Таблица 1

Интерпретация массивов в банках данных в причинно-следственных категориях

| Банк ядер $h : \Omega \rightarrow \Omega$ | | Банк операций $\omega : \Omega \times \Omega \rightarrow \Omega$ | | | Банк операций $k : \Omega \rightarrow \Omega \times \Omega$ | | |
|---|------------------|--|-----------|----------------|---|-----------|-----------|
| Группа причины | Группа следствия | Причина | Условие 1 | Группа причины | Группа следствия | Следствие | Условие 2 |

2. АЛГЕБРА ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Операции над звеньями и комплексами определяются так, чтобы вариант $a \in \Omega$ & $\bar{a} \in \Omega$ (аналог противоречия) не использовался в операции и в результате, полученном применением операции. Обозначим через $P^*(\Omega)$ множество всех тех элементов множества $P(\Omega)$, которые ни для какого $a \in \Omega$ не содержат одновременно a и \bar{a} .

Определение 1. Элементарным звеном причинно-следственной связи будем называть совокупность семи объектов $a = ((a, b), (c, d), \rho, \omega, k)$, где a, b, c и d — элементы множества $P^*(\Omega)$, ρ — бинарное отношение вида $\rho \subset (P^*(\Omega) \times P^*(\Omega) \times P^*(\Omega) \times P^*(\Omega))$, ω — операция совмещения вида $\omega: P^*(\Omega) \times P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega)$, а k — операция расщепления вида $k: P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega) \times P^*(\Omega)$. ♦

Пара (a, b) называется группой причины (a — причина, b — условие 1), а пара (c, d) — группой следствия (c — следствие, d — условие 2).

Правила, определяющие бинарное отношение ρ , представлены ядром звена с учетом операций совмещения и расщепления. Операция совмещения ω позволяет рассматривать ядро как отображение h вида $h: P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega)$, что оказывается существенным при формальном определении ядра и его интерпретации. Задание операций таблицами частично содержит расчетные формулы, если они имеются.

Алгебра причинно-следственных комплексов имеет вид $a = (\Omega, \{\omega_i\}_{i \in I}, \{K_j\}_{j \in J}, \{h_m\}_{m \in M})$, Ω — алгебраическое множество, $(\{\omega_i\}_{i \in I}, \{K_j\}_{j \in J}, \{h_m\}_{m \in M})$ — система алгебраических операций, где $\omega_i: P^*(\Omega) \times P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega)$, $K_j: P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega) \times P^*(\Omega)$, $h_m: P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega)$. Введение операций совмеще-

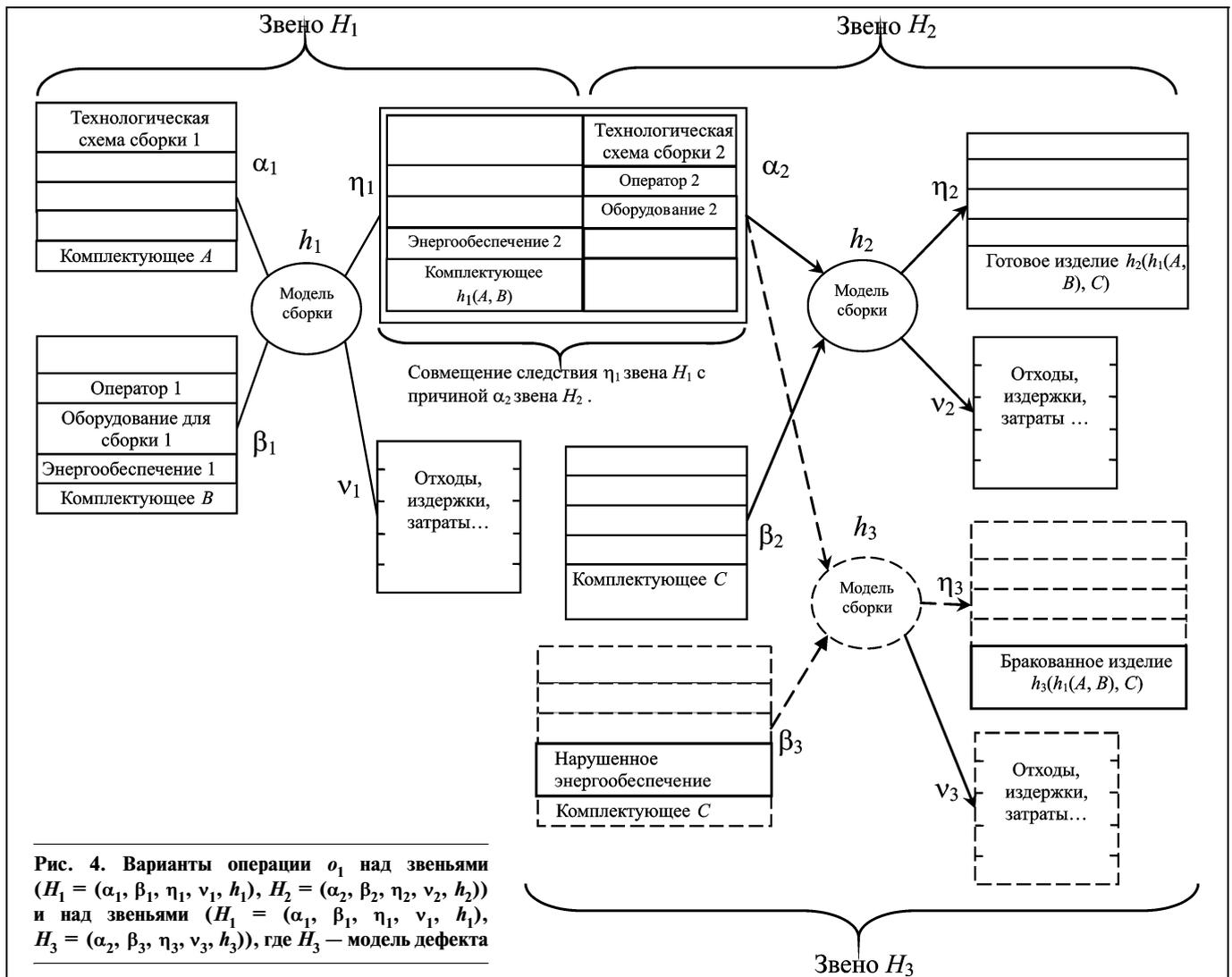


Рис. 4. Варианты операции o_1 над звеньями ($H_1 = (\alpha_1, \beta_1, \eta_1, \nu_1, h_1)$, $H_2 = (\alpha_2, \beta_2, \eta_2, \nu_2, h_2)$) и над звеньями ($H_1 = (\alpha_1, \beta_1, \eta_1, \nu_1, h_1)$, $H_3 = (\alpha_2, \beta_3, \eta_3, \nu_3, h_3)$), где H_3 — модель дефекта



ния ω и расщепления k не использовалось в работах [1—9, 15] и других, так как в разрабатываемых ранее моделях производственных процессов рассматривались только однородные процессы (например, только командно-информационные процессы, только процессы энергообеспечения и т. д.), а остальные процессы предполагались зафиксированными.

Например, при анализе функционирования авиационно-транспортной системы (АТС) [7] рассматриваются функциональные отказы (ФО). Они определяются как состояния АТС, в которых нарушены ее функциональные свойства, порождающие неработоспособные состояния системы в целом, независимо от причин, вызвавших это состояние. В связи с этим при определении причинно-следственных связей разнородных процессов, образующих функционирование АТС и возникновение ФО, требуется исследовать связь ФО с действиями по их парированию (ликвидации). Однако эффективность действий по парированию функциональных отказов в связи с тем, что ФО может иметь несколько вариантов причин, его порождающих, зависит от учета специфики причин. Переход от параметров, характеристик, свойств и других факторов, представляющих отдельные процессы и их взаимодействия в ФО, к обобщенным свойствам АТС в форме ФО требует использования причинно-следственных связей.

Таким образом, ядра в элементарных звеньях причинно-следственных связей и в комплексах причинно-следственных связей могут определяться как связи между базовыми процессами и как связи между функциональными свойствами рассматриваемого объекта.

На рис. 4 приведен пример использования операции o_1 , определяемой тождеством $\eta_1 \equiv \alpha_2$. Часть $o_1(H_1, H_2)$ комплекса представляет сборку изделия $h_2(h_1(A, B), C)$ из комплектующих A, B и C , а компонент $o_1(H_1, H_3)$ — сборку бракованного изделия при нарушении энергообеспечения. Использование аппарата причинно-следственных комплексов позволяет для любых уровней полноты и точности представления анализировать функционирование сложных систем в нормальном и нарушенном [7] режимах функционирования систем.

3. ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ЯЗЫК АЛГЕБРЫ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Результаты операции могут быть представлены формулами языка причинно-следственных комплексов. Такие формулы конструируются по правилам композиции структурных автоматов. Причинно-следственные комплексы предназначены для

систематизации и формализации сложных взаимосвязей и взаимодействий, поэтому их структура должна быть иерархической. Для повышения эффективности различных процедур (анализа, синтеза, оптимизации, распознавания и др.) структуре причинно-следственных комплексов придается свойство фрактальности, т. е. подобия целого любым его компонентам, включая элементарные звенья. Это позволяет на любом уровне иерархии сохранять явный вид причин, следствий, условий и ядер.

Предназначение ядра в элементарном звене, в части комплекса и комплексе причинно-следственных связей состоит в описании связей группы причины с группой следствия. Иерархическое построение комплекса предполагает, что ядра уточняются в направлении от предыдущего уровня иерархии к следующему путем замены в ядрах общих описаний точными операциями над компонентами. Ядра включают в себя математические формулы, определяющие числовые зависимости показателей компонентов, а также связи символьных показателей, точно определенные таблицами их соответствий.

Благодаря фрактальности каждое элементарное звено и каждый комплекс причинно-следственных связей имеют такую же форму зависимости. Это позволяет строить формулы, определяющие результат применения операции o_i , на основе только математической операции суперпозиции. Введем следующие обозначения для элементарных звеньев причинно-следственных связей: $H_1 = (\alpha_1, \beta_1, \eta_1, \nu_1, h_1)$ и $H_2 = (\alpha_2, \beta_2, \eta_2, \nu_2, h_2)$. При построении формул, определяющих звенья и комплексы причинно-следственных связей, будут использоваться обозначения, показанные на рис. 5.

Операции над звеньями и частями комплекса систематизируем аналогично операциям композиции при построении структурных автоматов в соответствии с правилами правильной композиции автоматов [5]. Результат каждой из 24-х операций задается тождеством и определяется четырьмя формулами: формулой, определяющей причину;

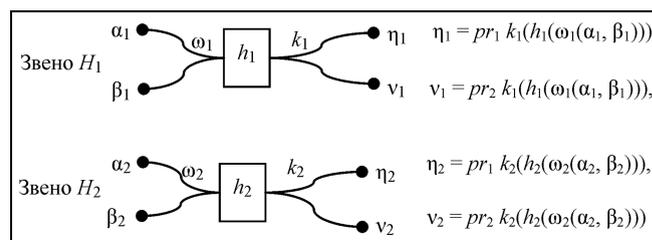


Рис. 5. Формулы функциональной зависимости следствия и условия 2 от причины и условия 1

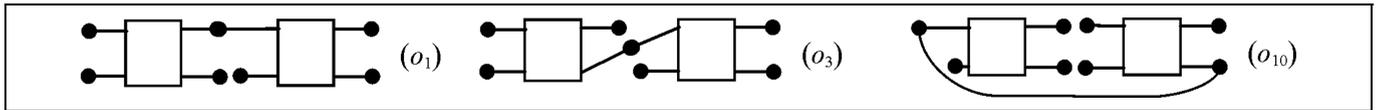


Рис. 6. Примеры схем операций последовательного соединения

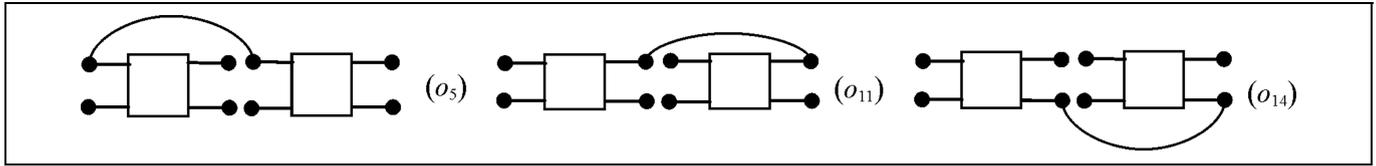


Рис. 7. Примеры схем операций параллельного соединения

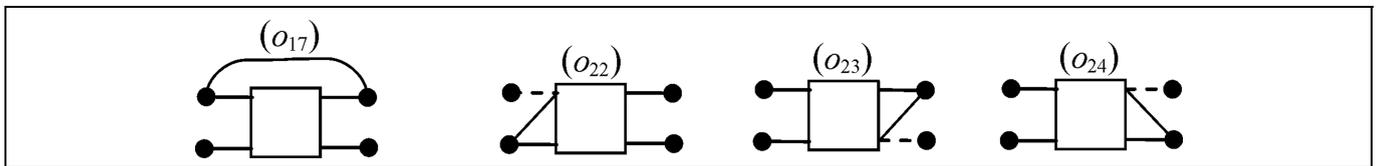


Рис. 8. Примеры схем унарных операций над звеньями и комплексами причинно-следственных связей

формулой, определяющей следствие и формулами, определяющими условия 1 и 2. На рис. 6—8 в обозначениях из работы [9] показана структура результатов композиции звеньев и комплексов причинно-следственных связей для операций последовательного соединения (см. рис. 6), операций параллельного соединения (см. рис. 7) и унарных операций (см. рис. 8). Аргументы операций композиции по построению имеют стандартные структуру и интерпретацию (см. рис. 1, 2, 5), что приводит к 24 вариантам операций композиции. Формализация взаимосвязей и взаимодействий группы причины и группы следствия основывается на достаточно строгом (в зависимости от возможностей) описании. Такое описание может включать в себя математические формулы, принятые на основании гипотез, отношений, опытных данных, результатов деятельности экспертов и др., что оказывается естественным в связи со сложностью задачи описания. Например, формулы, представляющие операции композиции o_1 и o_{15} , имеют вид:

- операция o_1 определяется тождеством $\eta_1 \equiv \alpha_2$;
в звене $o_1(H_1, H_2)$: a_1 — причина; $\omega_3(b_1, b_2)$ — условие 1; $pr_1(k_2(h_2(pr_1(k_1(h_1(\omega_1(a_1, b_1)))))))$ — следствие; $\omega_4(v_1, v_2)$ — условие 2;
- операция o_{15} определяется тождеством $\beta_1 \equiv v_2$;
в звене $o_{15}(H_1, H_2)$: $\omega_3(a_1, a_2)$ — причина; β_2 — условие 1;

$\omega_4(pr_1k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))), pr_1k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))))$ — следствие; $pr_2k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1)))$ — условие 2.

Очевидная простота структур операций композиции не означает, что операции простые. Например, в области приложений отождествлению узлов элементов должны быть даны не только интерпретация, но и точное определение. При совмещении операцией типа ω двух элементов универсума $\alpha, \beta \in \Omega$ (см. рис. 3) компоненты этих элементов α_2 (три специалиста) и β_2 (два специалиста) порождают компонент c_{22} элемента $\omega(\alpha, \beta)$, который на содержательном уровне может оказаться полной бригадой, просто набором из пяти специалистов или группой конфликтующих лиц. Это показывает сложность операций отождествления узлов.

Например, формулы, представляющие операции композиции o_6 и o_{11} , имеют вид:

- операция o_6 определяется тождеством $\alpha_1 \equiv \beta_2$;
в звене $o_6(H_1, H_2)$: α_2 — причина; β_1 — условие 1;
 $\omega_3(pr_1k_1(h_1(\omega_1(\omega_4(\alpha_1, \beta_2), \beta_1))), pr_1k_2(h_2(\omega_2(\omega_4(\alpha_1, \beta_2), \beta_2))))$ — следствие;
 $\omega_5(pr_2k_1(h_1(\omega_1(\omega_4(\alpha_1, \beta_2), \beta_1))), pr_2k_2(h_2(\omega_2(\omega_4(\alpha_1, \beta_2), \beta_2))))$ — условие 2;
- операция o_{11} определяется тождеством $\eta_1 \equiv \eta_2$;
в звене $o_{11}(H_1, H_2)$: $\omega_3(\alpha_1, \alpha_2)$ — причина; $\omega_4(\beta_1, \beta_2)$ — условие 1;



$\omega_5(pr_1k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))), pr_1k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))))$ — следствие;
 $\omega_6(pr_2k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))), pr_2k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))))$ — условие 2.

Еще большие сложности возникают при формализации унарных операций. Даже в случае композиции автоматов, представляющих собой однородные технические системы, образование обратных связей может приводить к логическим противоречиям, требует явного учета моментов времени и согласования разнородных процессов, объектов, событий, содержащихся в отождествляемых «узлах». Например, операции o_{17} и o_{24} изменяют два компонента звеньев, из которых один компонент полагается пустым и обозначается \emptyset . Этим операциям соответствуют следующие варианты отождествлений: $\alpha_1 \equiv \eta_1$, определяет цикл, где $\omega_3(\alpha_1, \eta_1) = \omega_3(\alpha_1, pr_1k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))))$, и \emptyset — причина, \emptyset — следствие, β_1 — условие 1, v_1 — условие 2 (для операции o_{17}); $\eta_1 \equiv v_1$, где \emptyset — следствие, $\omega_3(\eta_1, v_1)$ — условие 2 (для операции o_{24}).

Полный список формул, определяющих все 24 операции композиции, содержится, например, в работе [12].

4. ПРИМЕР ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ В БАНКАХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБЪЕДИНЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ

Сложная операция, задаваемая тождествами $\alpha_1 \equiv \alpha_2, \beta_1 \equiv \beta_2, \eta_1 \equiv \eta_2, v_1 \equiv v_2$, определяется формулами:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= pr_1k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))), & v_1 &= pr_2k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))), \\ \eta_2 &= pr_1k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))), & v_2 &= pr_2k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))), \\ \alpha_1 &= pr_1k_3(\alpha_3), & \alpha_2 &= pr_2k_3(\alpha_3), & \beta_1 &= pr_1k_4(\beta_3), \\ \beta_2 &= pr_2k_4(\beta_3), & \eta_3 &= \omega_3(\eta_1, \eta_2), & v_3 &= \omega_3(v_1, v_2). \end{aligned}$$

Структуру операции см. на рис. 9.

Операции вида ω_j, k_j и h_m определены в банках данных явно или с помощью математических формул, условий, ограничений и т. п. (табл. 2). Про-

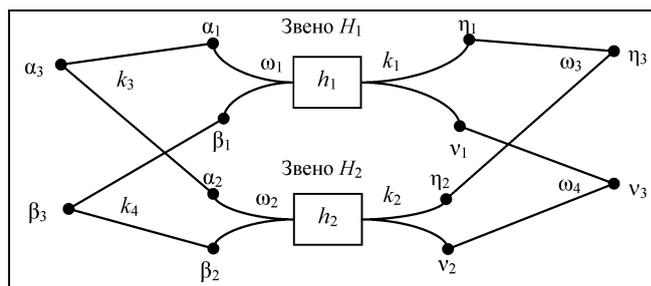


Рис. 9. Структура операции, задаваемой тождествами $\alpha_1 \equiv \alpha_2, \beta_1 \equiv \beta_2, \eta_1 \equiv \eta_2, v_1 \equiv v_2$

изводственный процесс представляется в комплексе причинно-следственных связей как последовательность таких наборов факторов, каждый из которых имеет активную (доступную и предполагаемую к формированию) часть α и пассивную (предполагаемую имеющейся) часть β . Совмещение частей α и β в группу причины порождает новое качество, которым не обладают эти части в отдельности. Например, совмещение станка, оператора и энергообеспечения порождает новое качество — возможность изготавливать продукцию. Совмещение этих факторов с технологической схемой изготовления и необходимых сырья и комплектующих определяет новое качество — ориентированное производство изделий. В связи с этим в банках данных, указанных в табл. 2, для символического представления исходных факторов (аргументов символических операций h, ω, K) таблично определяются результаты выполнения этих операций.

5. МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ

Алгебра и язык причинно-следственных комплексов с соответствующим построением банков данных, определяющих операции совмещения ω , расщепления k и преобразования h элементов универсума Ω , составляют методическую и конс-

Таблица 2

Структура элементов массивов при табличном задании ядра и операций совмещения и расщепления

| Банк ядер $h : \Omega \rightarrow \Omega$ | | Банк операций $\omega : \Omega \times \Omega \rightarrow \Omega$ | | | Банк операций $k : \Omega \rightarrow \Omega \times \Omega$ | | |
|---|------------------------------------|--|-----------|-------------------------------|---|------------|------------|
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| $\omega_1(\alpha_1, \beta_1)$ | $h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))$ | α_1 | β_1 | $\omega_1(\alpha_1, \beta_1)$ | $k_3(\alpha_3)$ | α_1 | α_2 |
| $\omega_2(\alpha_2, \beta_2)$ | $h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))$ | α_2 | β_2 | $\omega_2(\alpha_2, \beta_2)$ | $k_4(\beta_3)$ | β_1 | β_2 |
| ... | ... | η_1 | η_2 | $\omega_3(\eta_1, \eta_2)$ | $k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1)))$ | η_1 | v_1 |
| | | v_1 | v_2 | $\omega_4(v_1, v_2)$ | $k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))) \dots$ | η_2 | v_2 |
| | | ... | ... | ... | | ... | ... |

структивную основу построения кибернетических моделей взаимосвязей и взаимодействий объектов, процессов и явлений в сложных системах. Возможны различные варианты применения этих средств для разработки моделей. Рассмотрим метод построения моделей, ориентированных на решение следующей задачи.

Заданы: множество $Z \subset \bigcup_{i=1}^5 \Omega_i$; подмножество $\Theta \subset \Omega$; банки данных, определяющие операции совмещения ω , расщепления k и преобразования элементов множества Ω .

Требуется построить комплекс причинно-следственных связей вида $K = (\alpha, \beta, \eta, \nu, (pr_1 k(h(\omega(\alpha, \beta))))), (pr_2 k(h(\omega(\alpha, \beta))))$, для которого выполняются условия $\alpha \in \Theta, \beta \in \Theta$ и все элементы множества Z входят в элемент $(pr_1 k(h(\omega(\alpha, \beta))))$ универсума Ω .

Замечание. В комплексе причинно-следственных связей K элемент $\omega(\alpha, \beta)$ универсума Ω интерпретируется как группа причины с активно формируемой частью (причиной) α и имеющейся пассивной частью (условием 1) β . В группе следствия $h(\omega(\alpha, \beta))$ выделяется следствие $pr_1 k(h(\omega(\alpha, \beta)))$, в котором содержатся требующиеся для получения элементы множества Z . Оставшиеся после реализации причинно-следственных взаимодействий, описанных комплексом K , компоненты определяются комплексом как условие 2 $pr_1 k(h(\omega(\alpha, \beta)))$. Если причинно-следственный комплекс определяется для уже имеющегося производственного процесса, то его можно построить путем «покрытия» производственного процесса элементарными причинно-следственными звеньями. В этом случае элементарные причинно-следственные звенья являются моделями частей производственного процесса. ♦

Метод покрытия множества компонентов элементарными звеньями причинно-следственных связей состоит в следующем.

Этап 1. На основе банков данных, определяющих операции совмещения ω , расщепления k и преобразования h строится банк элементарных звеньев причинно-следственных связей, в котором каждое звено имеет вид: $H_i = (\alpha_i, \beta_i, \eta_i, \nu_i, (pr_1 k_i(h_i(\omega_i(\alpha_i, \beta_i))))), (pr_2 k_i(h_i(\omega_i(\alpha_i, \beta_i))))$.

Этап 2. В множестве Ω выделяется подмножество $\Omega(0) \subset \Omega$ таких элементов универсума, которые содержат все требующиеся компоненты, представленные как элементы множества Z .

Этап 3. Построение комплекса K систематизируется как построение последовательности комплексов

$$K(0), K(1), \dots, K(t_0) \quad (1)$$

и последовательности подмножеств компонентов

$$\Omega(0), \Omega(1), \dots, \Omega(t_0). \quad (2)$$

Комплекс $K(0)$ определяется как покрытие множества $\Omega(0)$ группами следствий элементарных звеньев из банка звеньев, сформированного на этапе 1.

Комплекс $K(t)$, где $t > 0$, определяется как покрытие группы причины комплекса $K(t-1)$ группами следствий, выбранных из банка звеньев элементарных звеньев причинно-следственных связей. Построение последовательностей (1) и (2) прекращается при условии, что комплекс $K(t_0)$ в группе причины содержит только элементы из множества Θ или построение такого комплекса невозможно (в последнем случае должны быть изменены условия задачи или дополнены банки данных, определяющих операции вида ω, k и h на основе расширения универсумов $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4, \Omega_5$).

В данном методе представлены основные положения построения комплексов причинно-следственных связей для совмещения разнородных процессов. Очевидным образом метод модифицируется изменениями направления покрытия элементарными звеньями:

- одновременное встречное «движение» двух направлений покрытия: покрытия множества Z следствиями звеньев и покрытия звеньями, группы причины которых включаются в множество Θ ;
- одновременное построение (или использование уже имеющихся) фрагментов комплекса K и их соединение в комплекс;
- формирование банка звеньев причинно-следственных связей как некоторого полного базиса и использование этого базиса аналогично проектированию технических систем из элементов функционально полного базиса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Разработаны основные положения и формальный аппарат (алгебра синтеза причинно-следственных комплексов и язык формул) для описания структуры производственных процессов. Предложена новая структура элементарных звеньев причинно-следственных связей, состоящая из причины, следствия, условия 1 реализации причинно-следственной связи, условия 2 реализации связи и ядра. Разработаны операции композиции, сохраняющие фрактальность, что позволяет на любом уровне иерархии причинно-следственного комплекса в явном виде получить разделение составляющих комплекса по категориям: причина, следствие, условие 1, условие 2. Выбранный набор однородных процессов (командно-информацион-



ные, подготовки и использования исполнителей, подготовки и использования оборудования, энергообеспечения, обеспечения комплектующими и сырьем), совмещается в единый производственный процесс, ориентированный на машиностроение. Специфическими и новыми являются операции совмещения и расщепления компонентов, без которых не достигается глубина и полнота описания производственного процесса. В связи группы причины и группы следствия выделена основная ее составляющая — ядро, которое в зависимости от уровня иерархии разрабатываемого комплекса причинно-следственных связей может быть представлено в различных вариантах математической строгости, полноты, связей числовых и содержательных показателей. Ядро — это совокупность правил, определяющих преобразование группы причины в группу следствия, и формально состоит из аналитических структур (числовых формул), алгоритмических компонентов, табличных заданий, полученных с помощью экспертов, и связей нечисловых показателей. Выполненные исследования показали применимость предложенных моделей для решения различных задач (управления, технического диагностирования, выявления причин аварий и др.) в сложных технических системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аскин Я.Ф. Философский детерминизм и научное познание. — М.: Мысль, 1977.
2. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Механика и прикладная математика. — М.: Наука, 1990. — 360 с.
3. Бусленко Н.П., Калашиков В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. — М.: Сов. радио, 1973. — 384 с.
4. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 400 с.
5. Интеллектуальное управление динамическими системами / С.Н. Васильев, А.К. Жерлов, Е.А. Федосов, Б.Е. Федун. — М.: Физматлит, 2002.
6. Глушков В.М. Синтез цифровых аппаратов. — М.: Физматгиз, 1962. — 435 с.
7. Гувер М., Зиммерс Э. САПР и автоматизация производства. — М.: Мир, 1987. — 528 с.
8. Логистические цепи сложно-технологических производств / Л.Б. Миротин, В.А. Корчагин, С.А. Ляпин, А.Г. Некрасов. — М., 2005. — 286 с.
9. Налетов И.З. Причинность и теория познания. — М.: Мысль, 1975.
10. Новиков Д.А., Смирнов И.М., Шохина Т.Е. Механизмы управления динамическими активными системами. — М.: ИПУ РАН, 2002. — 124 с.
11. Новожилов Г.В., Неймарк М.С., Цесарский Л.Г. Безопасность полета самолета: концепция и технология. — М.: Изд-во МАИ, 2007. — 196 с.
12. Первозванский А.А. Математические модели в управлении производством. — М.: Наука, 1975. — 616 с.
13. Проектирование технологий. — М.: Машиностроение, 1990. — 415 с.
14. Резчиков А.Ф., Твердохлебов В.А. Причинно-следственные комплексы как модели процессов в сложных системах // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2007. — № 7. — С. 2—8.
15. Резчиков А.Ф., Твердохлебов В.А. Причинно-следственные модели производственных систем. — Саратов: Научная книга, 2008. — 183 с. — ISBN 5-93888-920-0.
16. Цвирукун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. — М.: Наука, 1982. — 200 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Резчиков Александр Фёдорович — чл.-корр. РАН, директор, ☎ (8452) 22-23-76, ✉ iptmuran@san.ru,

Твердохлебов Владимир Александрович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, ☎ (8452) 22-23-40, ✉ tverdokhlebovva@list.ru,

Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов.



С 26 по 28 октября 2010 г. в Москве состоится V Международная конференция «Параллельные вычисления и задачи управления» (RASO'2010). Конференция проводится Институтом проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН при поддержке Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Российского национального комитета по автоматическому управлению и Научного совета РАН по теории управляемых процессов и автоматизации.

Тематика конференции

- Математические модели, вычислительные методы, программы и архитектуры распараллеливания вычислений
- Технологии программирования параллельных и распределенных систем
- Параллельные и распределенные вычисления в задачах моделирования, анализа, идентификации, управления и оптимизации
- Проблемы совместного проектирования и синтеза параллельных программ и архитектур
- Проблемы интеграции данных, программ, процессов и систем в глобальной компьютерной среде
- Архитектуры распределенных вычислительных и управляющих систем в компьютерных сетях
- Надежные вычисления и защита информации в распределенных компьютерных средах
- Компьютерные системы с самообучением и самоорганизацией
- Презентации проектов вычислительных и управляющих систем с параллельной и/или распределенной обработкой информации

Более подробную информацию можно найти на сайте <http://raso.ipu.ru>.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТРЕНАЖЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

О.В. Ершова

Рассмотрены вопросы разработки компьютерных тренажерных комплексов, предназначенных для обучения персонала и повышения эффективности управления электротермическим процессом на примере производства карбида кальция. Предложена структура комплексов, охарактеризованы функциональные компоненты, обеспечивающие приобретение навыков эффективного управления и контроль знаний.

Ключевые слова: компьютерный тренажерный комплекс, обучаемый инструктор, управление, электротермическое производство.

ВВЕДЕНИЕ

Спад производства в различных отраслях отечественной промышленности, обусловленный сложной экономической ситуацией последних лет, усугубляется в условиях финансового кризиса. Износ оборудования, недостаточное финансирование мероприятий по модернизации производства путем автоматизации различных уровней управления и внедрения современных программно-аппаратных средств, а иногда, к сожалению, и закрытие крупных и мелких предприятий и заводов, делают задачу возрождения отечественной промышленности особенно актуальной.

Современные химические производства, в том числе электротермические, характеризуются совокупностью сложного аппаратного оформления технологических процессов (ТП) и систем управления. К тому же происходит ужесточение требований к повышению надежности, безопасности эксплуатации производств и к качеству продукции, что требует улучшения качества управления процессами. Эффективность функционирования производств во многом зависит от квалификации производственного персонала различных категорий, осуществляющего их эксплуатацию и принимающего решения по управлению. Подготовка и переподготовку квалифицированных кадров необходимо проводить с использованием достижений в области компьютерных технологий и средств обучения.

В настоящее время подготовка персонала во многих отраслях осуществляется с помощью компьютерных тренажеров (КТ) и автоматизированных систем обучения, что соответствует сложившейся общемировой практике образования, поскольку применение в учебном процессе реального оборудования требует больших затрат или невозможно.

Разработка и внедрение на предприятиях эффективных средств обучения для повышения уровня квалификации персонала, который складывается из объема знаний, навыков и умений, приобретенных в процессе обучения, регламентируется федеральным законом № 116 «О промышленной безопасности производственных объектов» от 20 июня 1997 г.

Современные КТ должны обеспечивать углубленный тренинг операторов сложных ТП в управлении установками, давая практический опыт работы в разнообразных ситуациях: нормальные технологические условия при различных производительностях установок и свойствах сырья; нарушения технологических режимов и сбой в работе оборудования; плановые и аварийные останovy; переходы на новые технологические режимы. Компьютерные тренажеры незаменимы для вновь строящихся и кардинально реконструируемых установок, однако и в условиях уже функционирующего глубоко автоматизированного технологического объекта тренажеры необходимы, чтобы в отсутствие аварийных ситуаций не позволить операторам



утерять навыки управления. Важно также обеспечить на основе КТ возможность оценки навыков и профессиональных умений операторов для их последующей тарификации и сертификации [1].

Анализ состояния российской электротермической промышленности показал, что в этой отрасли КТ не нашли широкого применения по различным причинам. А учитывая сложность и потенциальную опасность этих производств, актуальность разработки соответствующих компьютерных тренажерных комплексов (КТК) для подготовки квалифицированного персонала очевидна.

Разработка КТК для подготовки оперативно-технического персонала электротермических производств осуществлялась в соответствии со следующими принципами [2]: описание ТП как системы обучения и тренажа; описание типовой структуры КТК, включающей в себя компоненты, решающие задачи обучения, тренажа и управления в зависимости от характеристик объекта; разработка моделей объекта, в том числе для представления неформализованных знаний, информационных и математических моделей, необходимых для изучения причинно-следственных связей в объекте изучения и управления, а также для овладения навыками безаварийного управления, прогнозирования и устранения нарушений; разработка алгоритмов управления, направленных на улучшение технологических и технико-экономических показателей производства; разработка интерфейса обучаемого, позволяющего приобретать навыки управления различным категориям персонала при различных режимах функционирования объекта; разработка интерфейса инструктора, включающего в себя сценарии обучения, модель контроля знаний, позволяющую инструктору иметь объективные количественные и качественные оценки знаний обучаемых, протокол обучения, алгоритмы настройки КТК в зависимости от знаний обучаемых и для различных режимов эксплуатации объекта управления.

Целесообразно интегрировать тренажерные комплексы в АСУТП, при этом заложенные в них алгоритмы управления будут пригодны для применения в процессе работы АСУТП.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Вопросы разработки КТК рассматриваются на примере электротермического производства карбида кальция [3]. Процесс реализуется в электродуговых печах и включает в себя стадии подготовки сырья и электродной массы, подготовку шихты (смеси сырьевых компонентов в определенной пропорции), производство целевого продукта в ванне печи под действием высокой температуры,

очистку от печных газов, выпуск побочного продукта — ферросплава.

При описании ТП как системы обучения и тренажа необходимо учитывать такие его признаки: особенности аппаратно-технологического оформления объекта; характеристики режимов эксплуатации объекта (аварийные, регламентные, оптимальные); характеристику режимов функционирования объекта в зависимости от состава сырья и требуемой производительности; характеристику возмущающих воздействий и др.

2. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Начальный этап разработки КТК состоит в структуризации информации в целях создания информационного обеспечения и разработки базы данных (БД), в которой параметры ТП классифицированы и хранятся в различных таблицах как входные, управляющие и выходные [4]. В БД содержится информация о характеристиках сырья, его расходах, геометрических размерах и мощности печи (входные параметры), о качестве и количестве целевого и побочных продуктов, производительности, электрических показателях (выходные параметры), пороговые ограничения для всех параметров.

Для описания экспертных знаний и данных эксплуатации объекта при изучении типовых нестандартных ситуаций (НС), необходима база знаний (БЗ), которая содержит перечень ситуаций, причины возникновения и рекомендации по их устранению. Классификация ситуаций в БЗ осуществляется сочетанием параметров БД, описывающих каждую ситуацию. По мере необходимости БД и БЗ могут обновляться и дополняться.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Параметры связаны математической моделью (ММ) процесса, включающей в себя уравнения, отражающие зависимость выходных параметров от входных, учитывающие химические реакции и их кинетические характеристики, распределение энергопотоков в подэлектродном пространстве ванны печи, взаимосвязь электрических параметров.

Задача синтеза ММ заключается в определении ее структуры, которой соответствуют рассчитанные по модели выходные параметры, описывающие объект изучения и управления с допустимой точностью в области адекватности, задаваемой настройками объекта, архитектурой и параметрами тренажера, обеспечивая интеграцию модели в структуру тренажерного комплекса.

Процесс получения карбида кальция следует охарактеризовать как массо-теплообменный про-

цесс, осложненный химической реакцией [3]. Трудность динамического моделирования процесса возникает из-за напряженности электрического поля, изменения размеров и агрегатного состояния слоев в зоне реакций, их перемешивания и взаимодействия. Учитывая, что на границах зон основные параметры меняются скачкообразно, а внутри зон эти параметры связаны, возможно позонное моделирование. Поэтому для разработки модели процесса, отражающей зависимость качества продукта от качества и количества сырья, необходим анализ механизма химического взаимодействия основных компонентов: кокса (С) и извести (СаО), а затем расчет многокомпонентного материально-энергетического баланса и учет кинетических характеристик процесса для определения времени образования целевого продукта.

В результате расчета материального баланса, учитывающего реакции взаимодействия основных компонентов, входящих в исходное сырье, и реакции восстановления примесей сырья, образования шлака и металла, определяются расходы кокса и извести для производства продукта требуемого качества.

Уравнения материального баланса имеют вид:

$$\sum_{pr=1}^z Y_{pr} C_j^{pr} = \sum_{s=1}^m X_s C_j^s,$$

где X_s — количество сырья, поступающего с шихтой (расход), т/ч; $s = \overline{1, m}$, где m — число входных потоков — компонентов шихты и вспомогательных материалов; C_j^s — концентрация j -го химического компонента в s -м входном потоке (химический состав сырья), %; $j = \overline{1, n}$, где n — число химических компонентов, участвующих в реакциях взаимодействия при производстве продукта; Y_{pr} — количество целевого и побочных продуктов реакции, т/ч; $pr = \overline{1, z}$, где z — число продуктов реакции; C_j^{pr} — концентрация j -го химического компонента в pr -м целевом и побочных продуктах реакции (качество продукта), %.

По энергетическому балансу учитывается расход электроэнергии, который зависит от мощности печи, качества карбида кальция и качества сырья. Энергетический баланс учитывает расход энергии на основные и побочные реакции, нагрев продуктов: карбида, металла, газа, пыли, плавление карбида и металла, сгорание углеродистого материала в печи, тепловые и электрические потери. Сумма всех расходов дает удельный расход электроэнергии на одну тонну карбида кальция заданного качества [3].

Кинетические закономерности гетерогенных процессов, протекающих при образовании карби-

да кальция, моделировались, исходя из следующих функциональных зависимостей:

- взаимодействие извести с расплавом $dC/d\tau = -K_u S_u (C_p - C_T)$, где $dC/d\tau$ — скорость процесса растворения извести; K_u — константа скорости, $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$; S_u — поверхность контакта, см^2 ; C_p — предельная концентрация карбида кальция (СаС₂, %) в расплаве в момент опускания в него извести, определялась путем изменения концентрации карбида кальция в расплаве при заданной температуре; C_T — текущая концентрация карбида кальция (СаС₂, %) в расплаве;
- взаимодействие углеродистого восстановителя с расплавом

$$dC/d\tau = K_y (C_p - C_T)^n,$$

где $dC/d\tau$ — скорость процесса восстановления; n — кажущийся порядок процесса; K_y — константа скорости, $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$; C_p — предельная концентрация карбида кальция (СаС₂, %) в расплаве в момент опускания в него кусков восстановителя при заданной температуре; C_T — текущая концентрация карбида кальция (СаС₂, %) в расплаве.

Для решения дифференциальных уравнений был применен численный метод Рунге—Кутты, обеспечивающий устойчивое и точное решение.

В результате решения уравнений кинетики определяется время образования и, соответственно, время слива целевого продукта. В процессе управления карбидной печью при изменении типа сырья корректируется режим слива произведенного карбида кальция.

По алгоритмам управления определяются значения управляющих воздействий (расходы сырья и положение электрода), обеспечивающие оптимальный режим ТП. В качестве критериев оптимизации целесообразно принять производительность печной установки, качество целевого продукта или прибыль, значения которых необходимо максимизировать при соблюдении ограничений на изменения параметров.

Модель представления знаний представляет собой систематизированное словесное описание объекта обучения. Она описывает нештатные ситуации, позволяет выявлять причины их возникновения и предлагает рекомендации по их устранению для нормализации режима работы объекта. Данная модель разработана на основе анализа данных эксплуатации объекта, знаний экспертов, знаний и опыта высококвалифицированных химиков-технологов и операторов по поведению в нештатных ситуациях.

Таким образом, математическое описание процесса получения карбида кальция разработано на



основе анализа физико-химических свойств процесса, включает в себя уравнения материального и энергетического балансов процесса, реакции взаимодействия основных компонентов и примесей, формализацию экспертных знаний, описание кинетических зависимостей, алгоритмы решения математической модели.

Математическая модель позволяет определять параметры процесса, обеспечивающие регламентные (требуемые) режимные показатели, и обучать операторов управлению процессом в различных режимах, например, при различной производительности или при использовании различного сырья.

4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для проектирования и эксплуатации АСУТП в настоящее время широко применяется SCADA-системы (системы диспетчерского управления и сбора данных), поэтому было решено, что целесообразно применить их и для разработки ТК, поскольку обучаемый (оператор) будет управлять процессом посредством автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора, созданного средствами соответствующей SCADA-системы.

Программные продукты класса SCADA широко представлены на мировом рынке. Это десятки SCADA-систем, многие из которых нашли применение в России. Наиболее популярные из них InTouch («Wonderware», США); Citect («CI Technology», Австралия), iFIX («Intellution, США), Genesis («Iconics Co», США), RealFlex («BJ Software Systems», США), Sitex («Jade Software», Великобритания), Simplicity («GE Fanuc», США), TraceMode («AdAstrA», Россия) и др.

В качестве инструмента для создания программного обеспечения (ПО) тренажерного комплекса была выбрана SCADA-система InTouch фирмы «Wonderware» — одна из самых распространенных и имеющая большое число инсталляций в мире. Преимущество InTouch перед другими SCADA-системами заключается в следующем: простота освоения и эксплуатации, доступность; функциональность; открытость; наличие объектно-ориентированной графики, широкого спектра анимационных функций; возможность применения шаблонов при создании объектов приложения; наличие библиотеки мастер-объектов и др.

На основании опыта работ и анализа литературных источников определены последовательность разработки и функционально-информационная структура КТК, реализованная средствами SCADA-системы InTouch. Разработка КТК осуществлялась по следующим этапам. Вначале был изучен ТП и проведена классификация всех параметров процесса при рассмотрении его как объекта изучения и управления. На этом этапе опреде-

лялись диапазоны изменений значений технологических параметров (регламентные, аварийные) в аспекте возникновения возможных НС, поскольку важная задача обучения операторов заключается в приобретении навыков поведения в НС. В результате этого этапа разработана БД с соответствующими пороговыми ограничениями, выходы за которые имитируют возникновение НС. Отображение информации осуществлялось с помощью имеющихся в системе InTouch средств визуализации: анимации, временных графиков, динамических элементов отображения и управления и др.

Функционально-информационная структура программного обеспечения тренажерных комплексов представлена на рис. 1.

При реализации задач обучения объект управления представлен различными типами моделей. Для активного обучения управлению в регламентном режиме используется математическая модель (см п. математическое обеспечение), которая позволяет определять значения управляющих воздействий, обеспечивающих наилучшие значения технологических и технико-экономических показателей в соответствии с критериями эффективности функционирования ТП. Модель представления знаний используется для изучения типовых нештатных ситуаций, позволяет выявлять причины возникновения и предлагает рекомендации по их устранению для нормализации режима работы объекта.

Техническая структура распределенного КТК (рис. 2) включает в себя компоненты, разработанные в пакете Wonderware Development Studio: сервер Wonderware Historian («Industrial SQL Server»); Terminal Serves for InTouch, для организации работы обучаемых как «тонких клиентов»; АРМ обучаемых и инструктора, реализованные в InTouch.

Взаимодействие приложений инструктора и обучаемого осуществляется по сети Ethernet. Программный компонент Wonderware Historian («Industrial SQL Server») предназначен для хранения большого объема необходимых данных о текущих значениях параметров в компактном виде, их пороговых ограничениях, истории ТП и др.

Интерфейс (АРМ) обучаемого представлен набором динамических мнемосхем, таблицами значений исходных данных и результатов расчета, графиками реального времени, отображающими динамику изменения параметров. Интерфейс позволяет обучаемому наблюдать за процессом при изменении значений внешних воздействий, изучать их влияние на режимные параметры и качество целевого продукта, изменять значения управляющих воздействий при отклонении режима от регламентных показателей, т. е. выступать в роли оператора, управляющего реальной установкой.

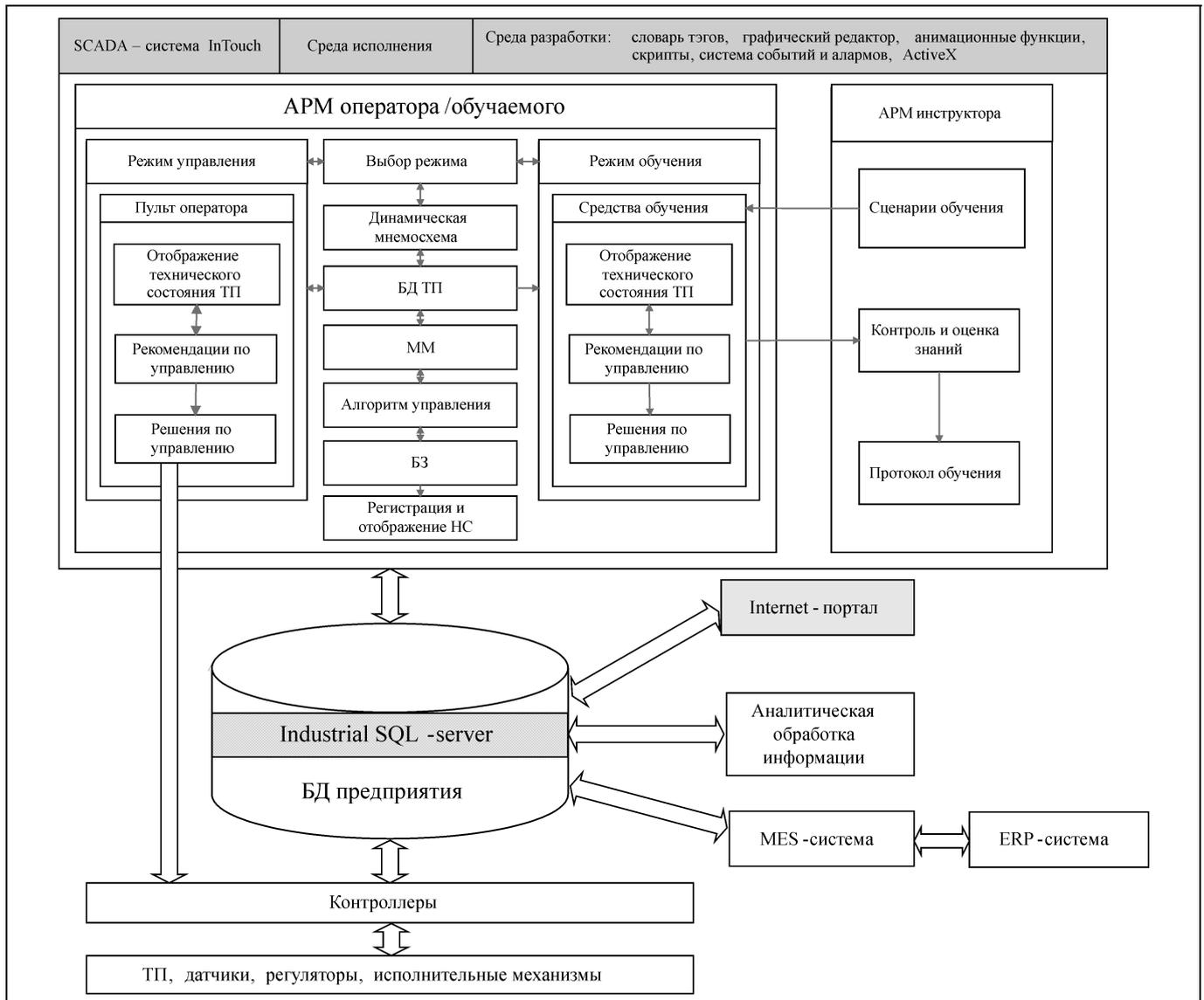


Рис. 1. Функционально-информационная структура программного обеспечения тренажерных комплексов в среде SCADA-системы InTouch:
 — инструментальные средства; — элементы разработанного ПО

Для организации и контроля процесса обучения предназначено АРМ инструктора. При разработке интерфейса инструктора использовались средства сигнализации, графического отображения информации, а также встроенная система событий и алармов InTouch. В составе Интерфейса инструктора имеются модуль настройки (число обучаемых, имена компьютеров обучаемых, выбор и изменение последовательности возникновения ситуаций, времени обучения) и модуль контроля знаний (имя обучаемого, результаты обучения, оценка, протокол обучения — все действия обучаемого и время обучения, время устранения ситуации). Инструктор определяет динамику процесса в соответствии со сценариями обучения или внося в

него возмущающие воздействия, имитируя возникновение штатных и нештатных ситуаций по своему усмотрению. У инструктора есть возможность настройки сценариев обучения с учетом индивидуальных психофизиологических особенностей обучаемого, например, путем изменения времени обучения или повторения имитации ситуаций, с которыми обучаемый не «справился» ранее. Он может задавать значения переменных из таблиц исходных данных, посылать сообщения, содержащие советы и рекомендации, на компьютер обучаемого. При этом все значения параметров по «команде» инструктора передаются в приложение обучаемого. Действия обучаемого заносятся в протокол обучения.

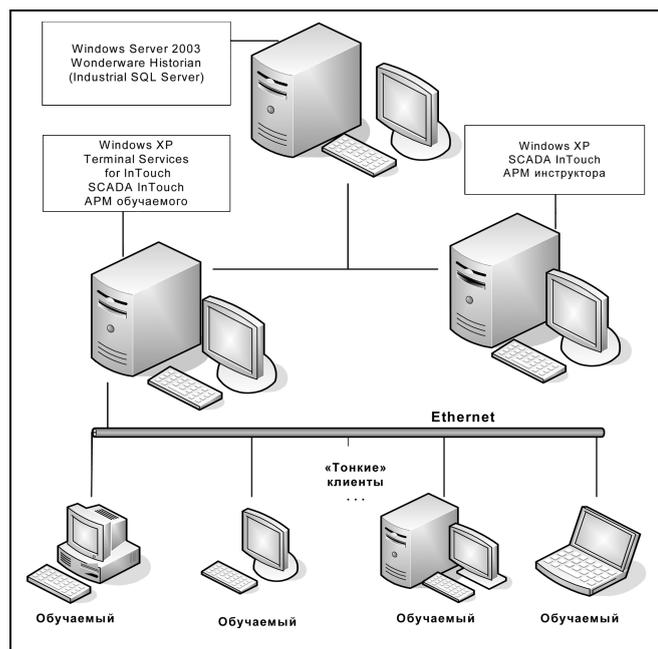


Рис. 2. Техническая структура распределенного КТК

В тренажерном комплексе предусмотрены различные варианты обучения:

- изучение теоретического материала с помощью информационно-справочной системы;
- изучение печной установки по ее трехмерной модели, разработанной в SolidWorks;
- тестирование знаний по теоретическому материалу и поведению персонала в аварийных ситуациях с помощью тестовой системы;
- изучение АРМ обучаемого, изучение ТП посредством мнемосхемы, ознакомление с вложенными окнами и динамическими элементами отображения и управления, возможность изменения значений управляющих воздействий в зависимости от значений выходных показателей и просмотра текущих значений параметров БД;
- настройка системы на конкретный печной агрегат (геометрия, мощность, производительность);
- настройка ограничений и регламентных значений технологических параметров БД;
- изучение причинно-следственных связей процесса (влияние входных параметров и управляющих воздействий на выходные) в штатных ситуациях, т. е. в режиме «свободного» обучения в целях изучения стандартных процедур управления и работы вблизи нормального технологического режима;
- приобретение навыков поведения в режиме нештатных ситуаций;
- работа по самостоятельно выбранному сценарию обучения, который моделирует возникновение НС, при этом обучаемому выдается окно, со-

держащее информацию о причинах ее возникновения, и предлагаются варианты по ее устранению;

- работа по заданному инструктором сценарию обучения.

Описанные функциональные компоненты КТК предназначены для организации процесса обучения с помощью существующих в настоящее время современных программно-аппаратных средств. При появлении новых версий среды разработки созданное ПО сохраняет свою работоспособность и, в случае необходимости, может быть модернизировано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация тренажерных комплексов в средах SCADA-систем обеспечивает повышение эффективности управления благодаря обучению персонала с помощью современных средств визуализации, различных методик обучения, приближения интерфейса обучаемого к промышленному интерфейсу оператора, который часто реализован в SCADA, приобретения и закрепления в процессе обучения навыков принятия верных решений по управлению при эксплуатации производства, ускорения реакции при возникновении нештатных ситуаций, снижения ошибок.

Тренажерные комплексы позволяют обучать операторов «с нуля», пополнять знания и приобретать необходимые навыки управления операторам, не имеющим большого опыта, а опытному персоналу повышать свою квалификацию.

Методика синтеза тренажерных комплексов протестирована на примере процессов производства карбида кальция и фосфора. Разработанные комплексы имеют свидетельства об официальной регистрации программных продуктов, прошли апробацию в учебном процессе и получили положительную экспертную оценку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. — М.: СИНТЕГ, 2009. — 372 с.
2. Чистякова Т.Б. Интеллектуальные автоматизированные тренажерно-обучающие комплексы в системах управления потенциально-опасными химическими производствами: автореф. дис... д-ра техн. наук. — СПб.: СПбГТИ (ТУ), 1997.
3. Ершова О.В. Система управления процессом получения карбида кальция: автореф. дис... канд. техн. наук. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 1996.
4. Ершова О.В., Лавров А.Б., Чистякова Т.Б. Технология разработки программного обеспечения тренажерных комплексов операторов электротермических производств // Автоматизация в промышленности. — 2005. — № 8. — С. 38.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Э.Л. Ицковичем.

Ершова Ольга Владимировна — канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), ☎ (812) 494-93-70, ✉ erol@rambler.ru.

ОРГАНИЗАЦИЯ ОДНОРОДНЫХ КОНКУРИРУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

П.А. Павлов

Получены формулы и оценки минимального общего времени выполнения однородных распределенных конкурирующих процессов. Проведен сравнительный анализ режимов взаимодействия процессов, процессоров и блоков структурированного программного ресурса с учетом дополнительных системных расходов.

Ключевые слова: распределенный процесс, программный ресурс, однородная система, асинхронный режим, синхронный режим, структурирование, параллелизм.

ВВЕДЕНИЕ

В различных областях человеческой деятельности постоянно приходится сталкиваться с большими задачами, эффективное решение которых связано с распараллеливанием процессов вычислений. В связи с этим особую актуальность приобретают задачи построения и исследования математических моделей обработки распараллеливаемых программных ресурсов с последующей их конвейеризацией по процессам и процессорам. Практический интерес представляют задачи определения временных характеристик однородных конкурирующих процессов, сравнительного анализа режимов взаимодействия распределенных процессов, получения условий эффективности систем однородных конкурирующих процессов с учетом накладных расходов по времени их реализации. Именно этим задачам посвящена настоящая статья.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ КОНКУРИРУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

В качестве конструктивных элементов для построения математических моделей распределенных вычислительных систем служат понятия процесса и программного ресурса.

Как и в работе [1], процесс будем рассматривать как последовательность блоков (команд, процедур) Q_1, Q_2, \dots, Q_s , для выполнения которых используется множество процессоров (процессорных узлов, обрабатывающих устройств). Процесс называется *распределенным*, если все блоки или часть из них обрабатываются разными процессорами. Для ускорения выполнения процессы могут обрабатываться параллельно, взаимодействуя путем обмена информацией. Такие процессы называются *кооперативными* или *взаимодействующими* процессами [2].

Понятие *ресурса* употребляется для обозначения любых объектов вычислительной системы, которые могут быть использованы процессами для своего выполнения. *Реентерабельные* (многократно используемые) ресурсы характеризуются возможностью их одновременного использования несколькими процессами. Для параллельных систем характерна ситуация, когда одну и ту же последовательность блоков или ее часть необходимо процессорам выполнять многократно, такую последовательность будем называть *программным ресурсом* (ПР), а множество соответствующих процессов — *конкурирующими*.

Решая проблему распределения программных ресурсов, неявно решаем задачи эффективного использования ресурсов остальных категорий. В свою очередь, эффективно решая задачу распределения программных ресурсов, решаем проблему сокра-



щения времени реализации множества параллельных распределенных процессов. Данные задачи можно эффективно решать, опираясь на методы структурирования, принципы распараллеливания и конвейеризации [2].

Как и в работах [1–5], математическая модель распределенной обработки конкурирующих процессов включает в себя p процессоров многопроцессорной системы (МС), n конкурирующих процессов, s блоков Q_1, Q_2, \dots, Q_s структурированного на блоки программного процесса, матрицу $T_p = [t_{ij}]$ времен выполнения j -х блоков i -ми конкурирующими процессами, причем $p \geq 2, n \geq 2, s \geq 2, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq s$. Будем предполагать, что все n процессов используют одну копию структурированного на блоки ПР, а на множестве блоков установлен линейный порядок их выполнения.

Введем в рассмотрение параметр $\tau > 0$, характеризующий время (системные расходы), затрачиваемые МС на организацию параллельного выполнения блоков программного ресурса множеством распределенных конкурирующих процессов. В дальнейшем будем говорить, что перечисленные объекты математической модели образуют *систему* распределенных конкурирующих процессов.

Определение 1. Система n распределенных конкурирующих процессов называется *неоднородной*, если времена выполнения блоков программного ресурса Q_1, Q_2, \dots, Q_s зависят от объемов обрабатываемых данных и (или) их структуры, т. е. разные для разных процессов. ♦

Определение 2. Система n распределенных конкурирующих процессов называется *однородной*, если времена выполнения j -го блока каждым из i -х процессов равны, т. е. $t_{ij} = t_j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, s}$. ♦

В работах [1, 2] введены режимы взаимодействия процессов, процессоров и блоков структурированного программного ресурса.

Асинхронный режим взаимодействия процессоров, процессов и блоков предполагает отсутствие простоев процессоров при условии готовности блоков, а также невыполнение блоков при наличии процессоров. На рис. 1 представлен пример диаграммы Ганта, которая отображает выполнение $n = 3$ однородных распределенных конкурирующих процессов, использующих структурированный на $s = 8$ блоков ПР в МС с $p = 3$ процессорами. Матрица времен выполнения блоков n конкурирующими процессами с учетом параметра τ имеет вид

$$T_p^\tau = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 2 & 3 & 1 & 4 & 2 & 3 \\ 2 & 4 & 2 & 3 & 1 & 4 & 2 & 3 \\ 2 & 4 & 2 & 3 & 1 & 4 & 2 & 3 \end{bmatrix}.$$

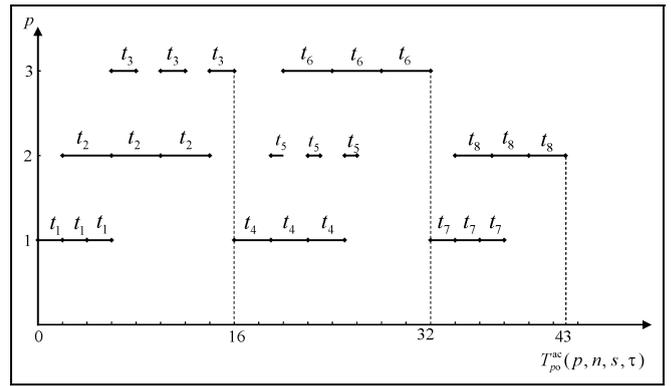


Рис. 1. Диаграмма асинхронного режима

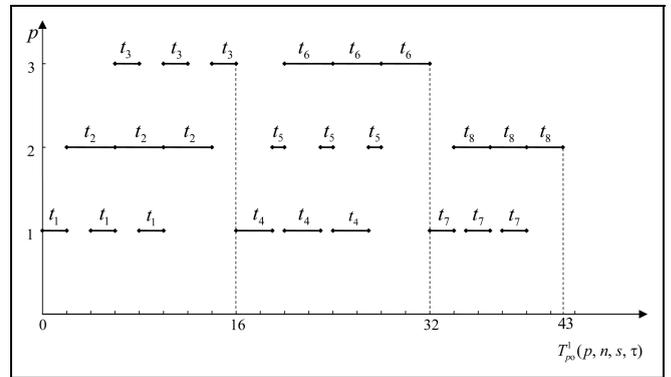


Рис. 2. Диаграмма первого синхронного режима

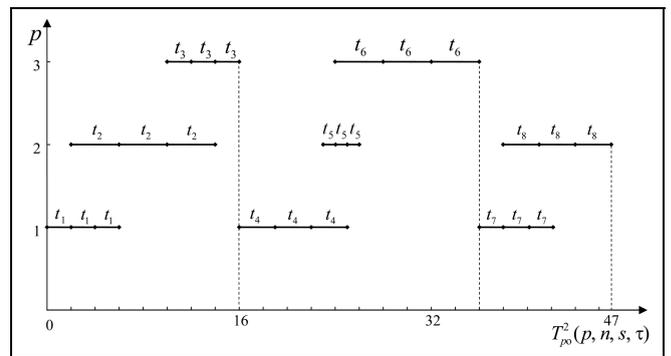


Рис. 3. Диаграмма второго синхронного режима

Так как $s > p, s = kp + r, k = 2, r = 2$, то мы имеем случай *ограниченного* параллелизма [1]. В этом случае исходную матрицу времен выполнения блоков T_p^τ разбиваем на $k + 1$ подматрицу $T_l^\tau, l = \overline{1, k + 1}$, размерностью $n \times p$ каждая, за исключением последней T_{k+1}^τ , которая будет содержать только r столбцов, а остальные $p - r$ столбцов будут нуле-

выми. По каждой из подматриц T_l^τ , $l = \overline{1, k+1}$, строим $k+1$ линейную диаграмму Ганта, каждая из которых отображает во времени выполнение p блоков структурированного ПР на p процессорах всеми n процессами. Последняя диаграмма отображает выполнение последних r блоков всеми n процессами.

Первый синхронный режим обеспечивает непрерывное выполнение блоков программного ресурса внутри каждого из процессов (рис. 2).

Второй синхронный режим обеспечивает непрерывное выполнение каждого блока всеми процессами (рис. 3).

2. ВРЕМЯ РЕАЛИЗАЦИИ ОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КОНКУРИРУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

В работах [1, 2] исследованы базовые асинхронный и синхронные режимы, возникающие при организации распределенных процессов в условиях конкуренции за общий программный ресурс. В рамках этих режимов получены математические соотношения для вычисления значений минимального общего времени выполнения неоднородных распределенных конкурирующих процессов в случаях *неограниченного* ($s \leq p$) и *ограниченного* ($s > p$) параллелизма по числу процессоров многопроцессорной системы.

Рассмотрим однородную систему распределенных конкурирующих процессов. Пусть $t_1^\tau, t_2^\tau, \dots, t_s^\tau$ — длительности выполнения каждого блока структурированного программного ресурса с учетом параметра $\tau > 0$.

При $s \leq p$ для вычисления минимального общего времени в *асинхронном* режиме $T_{po}^{ac}(p, n, s, \tau)$ и *первом синхронном* режиме $T_{po}^1(p, n, s, \tau)$ получим,

$$\text{что } T_{po}^{ac.1}(p, n, s, \tau) = \sum_{j=1}^s t_j^\tau + (n-1) \max_{1 \leq j \leq s} t_j^\tau.$$

Далее рассмотрим случай, когда $s = kp$, $k > 1$. Введем следующие обозначения: $t_j^{\tau, l} = t_{(l-1)p+j}^\tau + \tau$ — время выполнения j -го блока l -й группы всеми n процессами, $j = \overline{1, p}$, $l = \overline{1, k}$; $T_l = \sum_{j=1}^p t_j^{\tau, l} + (n-1) \times \max_{1 \leq j \leq p} t_j^{\tau, l}$ — общее время выполнения l -й группы блоков всеми n процессами на p процессорах,

$l = \overline{1, k}$; $E_l^j = \sum_{w=1}^j t_w^{\tau, l} + (n-1) \max_{1 \leq w \leq p} t_w^{\tau, l}$ — время завершения выполнения $[(l-1)p+j]$ -го блока программного ресурса всеми n процессами на j -м процессоре, $j = \overline{1, p}$, $l = \overline{1, k}$. Тогда общее время выполнения n конкурирующих распределенных однородных процессов в случае $s = kp$, $k > 1$, будет определяться как сумма длин составляющих диаграмм Ганта с учетом максимально допустимого совмещения по оси времени, т. е.

$$T_{po}^{ac.1}(p, n, s = kp, \tau) = \sum_{l=1}^k T_l - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\phi_l', \phi_l''\}.$$

Здесь ϕ_l' — отрезок возможного совмещения по оси времени, представляющий собой разность между моментом начала выполнения j -го блока первым процессом для $(l+1)$ -й группы блоков и моментом завершения выполнения j -го блока последним процессом для l -й группы блоков, а ϕ_l'' — представляет собой разность между началом выполнения первого блока i -м процессом для $(l+1)$ -й группы блоков и моментом завершения выполнения p -го блока i -м процессом для l -й группы блоков, которые вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \phi_l' &= \min_{1 \leq j \leq p} \left[T_l + \sum_{w=1}^{j-1} t_w^{\tau, l+1} - E_l^j \right] = \\ &= \min_{1 \leq j \leq p} \left[\sum_{w=j+1}^p t_w^{\tau, l} + \sum_{w=1}^{j-1} t_w^{\tau, l+1} \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_l'' &= (n-1) \min \left[\max_{1 \leq j \leq p} t_j^{\tau, l}, \max_{1 \leq j \leq p} t_j^{\tau, l+1} \right], \\ &l = \overline{1, k-1}. \end{aligned}$$

В случае $s = kp + r$, $k \geq 1$, $1 \leq r \leq p$, минимальное общее время в рассматриваемых режимах определяется по формуле:

$$\begin{aligned} T_{po}^{ac.1}(p, n, s = kp + r, \tau) &= \\ &= \sum_{l=1}^k T_l + T_{k+1} - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\phi_l', \phi_l''\} - \min\{\phi_k', \phi_k''\}, \end{aligned}$$

где $T_{k+1} = \sum_{j=1}^r t_j^{\tau, k+1} + (n-1) \max_{1 \leq j \leq r} t_j^{\tau, k+1}$ — время выполнения $(k+1)$ -й группы r блоков всеми n процессами, $\phi_k' = \min_{1 \leq j \leq r} \left[\sum_{w=j+1}^p t_w^{\tau, k} + \sum_{w=1}^{j-1} t_w^{\tau, k+1} \right]$ — разность между моментом начала выполнения j -го

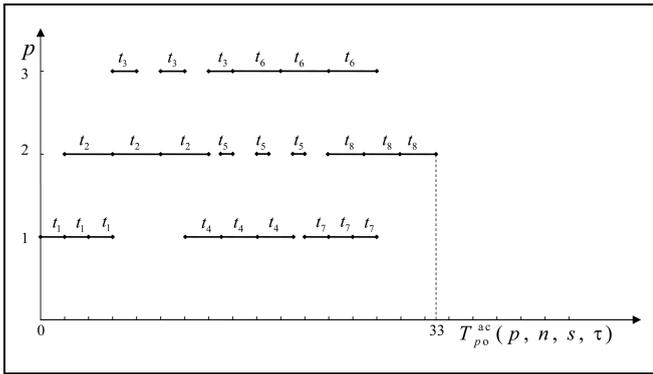


Рис. 4. Совмещенная диаграмма Ганта (асинхронный режим)

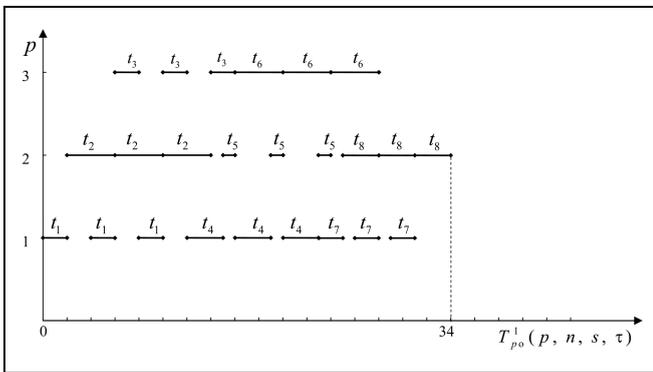


Рис. 5. Совмещенная диаграмма Ганта (первый синхронный режим)

блока первым процессом для $(k + 1)$ -й группы блоков и моментом завершения выполнения j -го блока последним процессом для k -й группы блоков, $\varphi_k'' = (n - 1) \min [\max_{1 \leq j \leq p} t_j^{\tau, l}, \max_{1 \leq j \leq r} t_j^{\tau, l+1}]$ — разность между началом выполнения первого блока i -м процессом для $(k + 1)$ -й группы блоков и моментом завершения выполнения p -го блока i -м процессом для k -й группы блоков.

Из рис. 1 и 2 видно, что $T_{po}^{ac}(p, n, s, \tau) = T_{po}^1(p, n, s, \tau) = 43$. Однако это время можно существенно сократить, если воспользоваться приемом совмещения последовательных диаграмм Ганта по оси времени справа налево на размер максимально допустимого совмещения (рис. 4 и 5).

Если взаимодействие процессов, процессоров и блоков осуществляется во *втором синхронном* режиме (см. рис. 3), при котором для каждого блока структурированного программного ресурса момент завершения его выполнения для i -го процесса совпадает с моментом начала его выпол-

нения для $(i + 1)$ -го процесса на том же процессоре, $i = \overline{1, n - 1}$, то минимальное общее время $T_{po}^2(p, n, s, \tau)$ выполнения n однородных процессов на p процессорах определяется по формулам:

$$T_{po}^2(p, n, s, \tau) = \sum_{j=1}^s t_j^{\tau} + (n - 1) \times \left[t_s^{\tau} + \sum_{j=2}^s \max\{t_{j-1}^{\tau} - t_j^{\tau}, 0\} \right] \text{ при } s \leq p,$$

$$T_{po}^2(p, n, s, \tau) \leq$$

$$\leq \begin{cases} \sum_{l=1}^k T_l - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\psi'_l, \psi''_l\} \text{ при } s = kp, k > 1; \\ \sum_{l=1}^k T_l + T_{k+1} - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\psi'_l, \psi''_l\} - \min\{\psi'_k, \psi''_k\} \\ \text{при } s = kp + r, k \geq 1, 1 \leq r < p. \end{cases} \quad (1)$$

Значения $T_l, \psi'_l, \psi''_l, T_{k+1}, \psi'_k, \psi''_k$ вычисляются соответственно по формулам:

- $T_l = \sum_{j=1}^p t_j^{\tau, l} + (n - 1) \left[t_p^{\tau, l} + \sum_{j=2}^p \max\{t_{j-1}^{\tau, l} - t_j^{\tau, l}, 0\} \right]$ — общее время выполнения l -х p блоков программного ресурса всеми n процессами на p процессорах, $l = \overline{1, k}$;
- ψ'_l и ψ''_l — отрезки возможного совмещения двух последовательных диаграмм по оси времени:

$$\psi'_l = \min_{1 \leq j \leq p} \{T_l + E_j^{l+1} - n t_j^{\tau, l+1} - E_j^l\},$$

$$\psi''_l = (n - 1) \min\{t_1^{\tau, l+1}, t_p^{\tau, l}\}, \quad l = \overline{1, k - 1};$$
- $E_j^l = \sum_{w=1}^j t_w^{\tau, l} + (n - 1) \left[t_j^{\tau, l} + \sum_{w=2}^j \max\{t_{w-1}^{\tau, l} - t_w^{\tau, l}, 0\} \right], j = \overline{1, p}, l = \overline{1, k}$ — время завершения выполнения $[(l - 1)p + j]$ -го блока программного ресурса всеми n процессами на j -м процессоре;
- $T_{k+1} = \sum_{j=1}^r t_j^{\tau, k+1} + (n - 1) \left[t_r^{\tau, k+1} + \sum_{j=2}^r \max\{t_{j-1}^{\tau, k+1} - t_j^{\tau, k+1}, 0\} \right]$ — время выполнения $(k + 1)$ -х r блоков для всех n процессов;

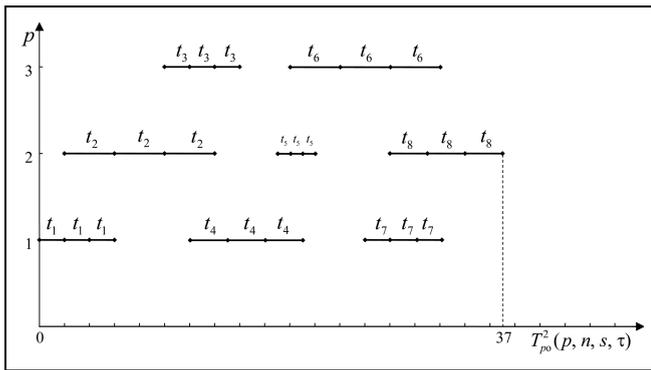


Рис. 6. Совмещенная диаграмма Ганта (второй синхронный режим)

- $\min\{\psi'_k, \psi''_k\}$ — максимальное совмещение по оси времени k -й и $(k + 1)$ -й диаграмм:

$$\psi'_k = \min_{1 \leq j \leq r} \{T_k + E_j^{k+1} - nt_j^{\tau, k+1} - E_j^k\},$$

$$\psi''_k = (n - 1) \min\{t_1^{\tau, k+1}, t_p^{\tau, k}\}.$$

В формуле (1) стоит знак неравенства, так как каждое значение $\min\{\psi'_l, \psi''_l\}$, $l = \overline{1, k-1}$, учитывает только максимально допустимое совмещение по оси времени между парами соседних диаграмм Ганта, но не всегда учитывает возможные совмещения между подряд идущими группами блоков, выполняющихся на одном и том же процессоре в двух соседних диаграммах.

С учетом максимально допустимого суммарного совмещения диаграмма Ганта для второго синхронного режима будет иметь вид, представленный на рис. 6.

3. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ОРГАНИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КОНКУРИРУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Определенный теоретический и практический интерес представляет задача сравнительного анализа соотношений для определения минимального общего времени выполнения множества распределенных конкурирующих процессов. Проведем такой анализ для класса однородных систем с учетом дополнительных системных расходов $\tau > 0$.

Рассмотрим однородную систему распределенных конкурирующих процессов с временами выполнения блоков структурированного на блоки программного процесса $t_1^{\tau}, t_2^{\tau}, \dots, t_s^{\tau}$. Обозначим

через $T_p^{\tau} = \sum_{j=1}^s t_j^{\tau}$ суммарное время выполнения

программного ресурса каждым из процессов с учетом накладных (системных) расходов и назовем на-

бор параметров $(t_1^{\tau}, t_2^{\tau}, \dots, t_s^{\tau}, T_p^{\tau})$ данной системы *характеристическим*.

Пусть $\beta = \left\{ (t_1^{\tau}, t_2^{\tau}, \dots, t_n^{\tau}, T_p^{\tau}) \mid T_p^{\tau} = \sum_{j=1}^s t_j^{\tau}, t_j^{\tau} = t_j + \tau > 0, j = \overline{1, s} \right\}$ — множество всех допустимых

характеристических наборов систем однородных конкурирующих процессов. Выделим из множества β подмножество характеристических наборов вида:

$$N(T_p^{\tau}) = \{(t_1^{\tau}, t_2^{\tau}, \dots, t_s^{\tau}, T_p^{\tau}) \in \beta \mid t_1^{\tau} \leq t_2^{\tau} \leq \dots \leq t_l^{\tau} \geq t_{l+1}^{\tau} \geq \dots \geq t_s^{\tau}, l = \overline{1, s}\}.$$

Тогда для введенного подмножества характеристических наборов справедливы следующие утверждения.

Теорема 1. Пусть $\delta \in N(T_p^{\tau})$ — характеристический набор любой однородной системы с параметрами $p, n, s \geq 2$ и накладными расходами $\tau > 0$. Тогда в случае неограниченного параллелизма минимальные общие времена T_{po}^{ac} , T_{po}^1 и T_{po}^2 выполнения множества однородных распределенных конкурирующих процессов в асинхронном и базовых синхронных режимах совпадают. ♦

Пусть $t_l^{\tau} = \max_{1 \leq j \leq s} t_j^{\tau}$. Тогда для асинхронного и первого синхронного режима с непрерывным переходом по блокам для любого характеристического допустимого набора однородной системы, в том числе и для любого характеристического набора $\delta \in N(T_p^{\tau})$ при $2 \leq s \leq p$, имеют место равенства:

$$T_{po}^{ac}(p, n, s, \tau) = T_{po}^1(p, n, s, \tau) = T_p^{\tau} + (n - 1)t_l^{\tau},$$

где $T_p^{\tau} = \sum_{j=1}^s t_j^{\tau}$, $t_j^{\tau} = t_j + \tau$, $j = \overline{1, s}$.

Если взаимодействие процессов, процессоров и блоков осуществляется во втором синхронном режиме (с непрерывным переходом по процессам), то для любого характеристического набора из множества β при $2 \leq s \leq p$ выполняется равенство:

$$T_{po}^2(p, n, s, \tau) = \sum_{j=1}^s t_j^{\tau} + (n - 1) \times \left[t_s^{\tau} + \sum_{j=2}^s \max\{t_{j-1}^{\tau} - t_j^{\tau}, 0\} \right].$$

Теорема 1 будет доказана, если будет выполняться равенство $t_s^{\tau} + \sum_{j=2}^s \max\{t_{j-1}^{\tau} - t_j^{\tau}, 0\} = t_l^{\tau}$. Учи-



тывая, что $t_i^\tau = \max_{1 \leq j < s} t_j^\tau$, для всех номеров $j \leq l$ имеет

место равенство $\sum_{j=2}^l \max\{t_{j-1}^\tau - t_j^\tau, 0\} = 0$, а для

$j > l$ имеет место $\sum_{j=l+1}^s \max\{t_{j-1}^\tau - t_j^\tau, 0\} = t_l^\tau - t_s^\tau$.

Следовательно, $t_s^\tau + \sum_{j=2}^s \max\{t_{j-1}^\tau - t_j^\tau, 0\} = t_s^\tau +$

$+ t_l^\tau - t_s^\tau = t_l^\tau$, что и требовалось доказать.

Теорема 2. Для любой однородной распределенной системы с параметрами p, n, s и накладными расходами $\tau > 0$, допустимый характеристический набор которой $\delta \notin H(T_p^\tau)$, при $2 \leq s \leq p$ выполняются

соотношения: $T_{po}^2(p, n, s, \tau) > T_{po}^{ac}(p, n, s, \tau) = T_{po}^1(p, n, s, \tau)$. ♦

Условие теоремы 2 равносильно неравенству

$$t_s^\tau + \sum_{j=2}^s \max\{t_{j-1}^\tau - t_j^\tau, 0\} - \max_{1 \leq j \leq s} t_j^\tau > 0.$$

Доказательство последнего проводится индукцией по числу блоков $s, s \geq 2$.

4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ОДНОРОДНЫХ КОНКУРИРУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ НЕОГРАНИЧЕННОГО ПАРАЛЛЕЛИЗМА

Введем следующее определение, которое выделяет в классе однородных систем конкурирующих процессов специальный подкласс так называемых *равномерных систем*.

Определение 1. Однородную распределенную систему конкурирующих процессов назовем *равномерной*, если выполняется цепочка равенств $t_1^\tau = t_2^\tau = \dots = t_s^\tau = t^\tau$. ♦

Согласно теореме 1 для однородных систем конкурирующих процессов минимальное общее время с учетом накладных расходов $\tau > 0$ для всех трех базовых режимов, указанных в § 1, в случае $s \leq p$ вычисляется по формуле:

$$T_{po}^{ac.1,2}(p, n, s, \tau) = T_p^\tau + (n-1)t_{\max}^\tau, \quad (1)$$

где $T_p^\tau = \sum_{j=1}^s t_j^\tau, t_j^\tau = t_j + \tau, j = \overline{1, s}, t_{\max}^\tau = \max_{1 \leq j \leq s} t_j^\tau$.

В случае равномерной однородной системы конкурирующих процессов минимальное общее время их выполнения определяется равенством

$$\bar{T}(p, n, s, \tau) = (n+s-1)t^\tau, \quad (2)$$

где $t^\tau = T^s/s + \tau, T^s = st$.

Определение 4. Однородную систему распределенных конкурирующих процессов будем называть *эффективной* при фиксированных $p, n \geq 2$, если выполняется соотношение $\Delta_\tau(s) = nT^s - \bar{T}(p, n, s, \tau) \geq 0$, где nT^s — время выполнения n процессов в последовательном режиме, а $T^s = \sum_{j=1}^s t_j$. ♦

При наличии двух эффективных однородных систем конкурирующих процессов будем считать, что первая более эффективна, чем вторая, если величина $\Delta_\tau(s)$ первой системы не меньше соответствующей величины второй. Для введенного подмножества однородных систем справедливо следующее утверждение.

Теорема 3. Для любой эффективной однородной системы конкурирующих процессов при $s \leq p$ и $\tau > 0$ существует более эффективная равномерная однородная распределенная система. ♦

Рассмотрим любую эффективную однородную распределенную систему. Согласно определению 4, условие ее эффективности с учетом формулы (1) записывается в виде следующего неравенства:

$$\Delta_\tau(s \leq p) = (n-1)(T^s - t_{\max}^s) - (n+s-1)\tau \geq 0, \quad (3)$$

где $T^s = \sum_{j=1}^s t_j, t_{\max}^s = \max_{1 \leq j \leq s} t_j$.

Для любой равномерной однородной распределенной системы с учетом равенства (2) имеем:

$$\bar{\Delta}_\tau(s \leq p) = (n-1)(T^s - t) - (n+s-1)\tau \geq 0,$$

где $t = T^s/s$.

Справедливость теоремы 3 доказывает выполнение неравенства $\bar{\Delta}_\tau \geq \Delta_\tau$ для введенных эффективных систем.

Следующее утверждение ставит достаточное условие эффективности однородной системы в случае неограниченного параллелизма.

Теорема 4. Однородная система конкурирующих процессов с параметрами p, n, s, τ , удовлетворяющая соотношениям $3 \leq s \leq p, s = n \neq 3, ns \geq 2(n+s-1)$ и $0 < \tau \leq \min_{1 \leq j \leq s} t_j$, является эффективной. ♦

Согласно неравенству (3) условие эффективности равносильно неравенству

$$\frac{T^s - t_{\max}^s}{\tau} \geq \frac{n+s-1}{n-1}. \quad (4)$$

Следовательно, для доказательства теоремы 4 достаточно убедиться в справедливости неравенства (4). Непосредственная проверка показывает,

что следствием соотношений $0 < \tau \leq \min_{1 \leq j \leq s} t_j^s = t_{\min}^s$ является цепочка неравенств:

$$\frac{T^s - t_{\max}^s}{\tau} \geq \frac{(s-1)t_{\min}^s}{\tau} \geq s-1, \quad (5)$$

так как в силу выбора параметра τ выполняется неравенство $t_{\min}^s / \tau \geq 1$.

Из $ns \geq 2(n+s-1)$ следует справедливость неравенства

$$s-1 \geq \frac{n+s-1}{n-1}. \quad (6)$$

Проверка показывает, что неравенство (4) является следствием неравенств (5) и (6).

Далее формулируется критерий существования эффективной однородной системы распределенных конкурирующих процессов при достаточном числе процессоров в зависимости от накладных расходов τ .

Теорема 5. Для существования эффективного структурирования программного ресурса при заданных параметрах $3 \leq s \leq p$, T^s , $\tau > 0$ необходимо и достаточно, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\tau \leq \begin{cases} \varphi(1 + \sqrt{n}), & \text{если } \sqrt{n} \text{ — целое,} \\ \max\{\varphi(1 + [\sqrt{n}]), \varphi(2 + [\sqrt{n}])\}, & \\ \text{если } \sqrt{n} \text{ — не целое,} \end{cases}$$

где $\varphi(x) = \frac{(n-1)T^n(x-1)}{x(n+x-1)}$, $[x]$ — наибольшее целое, не превосходящее x . ♦

Условие эффективности любой однородной распределенной системы конкурирующих процессов равносильно неравенству:

$$\varepsilon \leq \frac{(n-1)T^s(s-1)}{s(n+s-1)}. \quad (7)$$

Введем в рассмотрение функцию $\varphi(x) = \frac{(n-1)T^s(x-1)}{x(n+x-1)}$.

Нетрудно проверить, что она достигает своего максимума при $x > 0$ в точке $x = 1 + \sqrt{n}$. Выбрав в качестве эффективного структурирование на s блоков, при котором $s = x = 1 + \sqrt{n}$, если \sqrt{n} — целое, или $s = x \in \{1 + [\sqrt{n}], 2 + [\sqrt{n}]\}$, если \sqrt{n} — не целое, докажем необходимость.

Достаточность следует из неравенства (7), поскольку функция $\varphi(x)$ достигает наибольшего значения при $x = 1 + \sqrt{n}$, если \sqrt{n} — целое, или $x \in \{1 + [\sqrt{n}], 2 + [\sqrt{n}]\}$, если \sqrt{n} — не целое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены оценки минимального общего времени реализации однородных конкурирующих процессов, проведен анализ режимов взаимодействия однородных процессов, процессоров и блоков структурированного программного ресурса, показано, что эффективную однородную систему следует искать среди равномерных однородных систем, сформулированы критерии эффективности однородных систем в условиях неограниченного параллелизма и с учетом накладных расходов. Полученные формулы служат основой для решения задач оптимизации числа блоков при заданных остальных параметрах многопроцессорной системы, нахождения оптимального числа процессоров при заданных объемах вычислений и (или) директивных сроках реализации процессов, исследования всевозможных смешанных режимов организации выполнения параллельных процессов при распределенной обработке, в том числе с учетом ограниченного числа копий структурированного программного ресурса и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванников В.П., Коваленко Н.С., Метельский В.М. О минимальном времени реализации распределенных конкурирующих процессов в синхронных режимах // Программирование. — 2000. — № 5. — С. 44–52.
2. Коваленко Н.С., Самаль С.А. Вычислительные методы реализации интеллектуальных моделей сложных систем. — Минск: Бел. наука, 2004. — 166 с.
3. Kapitonova Yu.V., Kovalenko N.S., Pavlov P.A. Optimality of systems of identically distributed competing processes // Cybernetics and Systems Analysis. — New York: Springer, — 2006. — P. 793–799.
4. Павлов П.А. Анализ режимов организации одинаково распределенных конкурирующих процессов // Вестник БГУ / Сер. 1: Физ.-мат. информ. — 2006. — № 1. — С. 116–120.
5. Коваленко Н.С., Павлов П.А. Системы одинаково распределенных конкурирующих процессов в условиях ограниченного параллелизма и их оптимальность // Доклады НАН Беларуси / Сер. физ.-мат. наук. — 2006. — № 2. — С. 25–29.

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН П.П. Пархоменко.

Павлов Павел Александрович — канд. физ.-мат. наук, доцент, Полесский государственный университет, Республика Беларусь, г. Пинск, ☎+375 (0) 165-32-21-23, ✉ p.a.pavlov@mail.ru.

БЛИЗКОЕ К ОПТИМАЛЬНОМУ УПРАВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЕЙ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

А.Б. Шубин, Е.Г. Александров, Г.Г. Харченков

На модели корабля, описываемой системой дифференциальных нелинейных уравнений пятого порядка, рассмотрена задача расчета управления, переводящего корабль из начальной точки водного пространства в конечную с заданными фазовыми координатами и скоростью. Показано, что для такого перевода корабля требуется только пять переключений руля, рассчитанных с помощью алгоритма программного управления. Приведены результаты моделирования траекторий движения, в частности, движения по извилистому узкому каналу и движения с переменной скоростью.

Ключевые слова: оптимальное управление, подвижный объект, модель корабля, расчет управления, моделирование, траектория.

ВВЕДЕНИЕ

Зависимость траектории некоторых управляемых подвижных объектов, например, кораблей, от управления описывается довольно сложной системой нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Для надводных кораблей этот порядок в случае упрощенных моделей достигает 5–6, для подводных кораблей он еще выше. Применение известных традиционных методов формирования управляющих воздействий приводит к большому числу переключений руля и увеличению времени движения по заданной траектории, выбранной исходя из навигационной обстановки.

Поиск новых более эффективных алгоритмов управления, использующих современные ЦВМ и информацию от датчиков основных параметров движения кораблей и окружающей обстановки, привел к появлению различных методов программного управления, которые в ряде случаев оказываются оптимальным по быстрдействию, что показал А.А. Фельдбаум [1]. Позднее Л.С. Понтрягиным был разработан принцип максимума, позволяющий рассчитывать оптимальное управление во многих практических случаях [2]. Сравнительно много примеров оптимального решения задач управления можно найти в работе [3].

Некоторыми авторами предлагался прием моделирования процесса управления в ускоренном масштабе времени [4, 5]. Однако в этих работах прогнозирование траектории модели объекта использовалось лишь как помощь оператору при ручном управлении или как средство конструирования линий и поверхностей переключения знака управления, что применимо лишь в случае простых дифференциальных уравнений небольшой размерности.

В Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН предложены оригинальные способы вычисления управления сложными динамическими объектами, описываемыми дифференциальными уравнениями высокого порядка, и разработаны так называемые алгоритмы программного управления (АПУ). Реализованные на ЦВМ алгоритмы вычисляют программы кусочно-постоянного управления (в простейшем случае), позволяющие переводить объект управления из известной начальной точки в заданную конечную. При этом программа состоит по времени из n интервалов постоянства знаков управления.

В данной статье описан метод вычисления управляющего воздействия на рули, позволяющий при минимальном числе переключений руля реализовать траекторию, проходящую через заданные точки.

1. ИТЕРАТИВНЫЙ АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Впервые итеративный алгоритм нахождения программного управления представлен в работе [6], затем был применен в работе [7]. Пусть объект описывается уравнением

$$x^{(n)} + G(x^{(n-1)}, \dots, x) = u(t), \quad u(t) = \pm 1, \quad (1)$$

где x — выходная координата объекта, $x^{(i)}$ — ее производные, $u(t)$ — управление, G — некоторая функция, t — время.

Обозначим $x = x_1$, $x^{(1)} = x_2$, ..., $x^{(n-1)} = x_n$. Совокупность фазовых координат обозначим \bar{X} .

Задача заключается в том, чтобы найти управление $0 \leq u(t) \leq T$ с n участками постоянства, переводящее объект из точки \bar{X}_0 в момент $t = 0$ в заданную точку \bar{X}_* в момент $t = T$. Предполагается, что $\bar{X}_* \in D_*$, где D_* — область достижимости, т. е. управление $u(t)$ существует. Очевидно, что область D_* зависит от вида уравнения (1), координат \bar{X}_0 и \bar{X}_* .

Управление $u(t)$ будем искать в виде знакопеременных функций, меняющих знак $n - 1$ раз, т. е. имеющих n интервалов постоянства значения. Каждую такую функцию можно однозначно определить совокупностью чисел $\bar{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_k, \dots, s_n\}$ при помощи следующего правила: длительность k -го интервала постоянства равна $\tau_k = |s_k|$, а значение управления на этом интервале $u(t, \bar{S}) = \text{sign}(s_k)$, здесь и далее $\text{sign}(s_k) = +1$ при $s_k \geq 0$ и $\text{sign}(s_k) = -1$ при $s_k < 0$. Таким образом, совокупность \bar{S} полностью определяет управление $u(t)$ на отрезке времени $0 \leq t \leq T$, где:

$$T = \sum_1^n |s_i|.$$

Компоненты s_k совокупности \bar{S} назовем определителями интервалов управления. Фазовые координаты $x_i(t)$, также как и их конечные значения $x_i(T)$, зависят от координат точки \bar{X}_0 и управления $u(t)$, а следовательно, от определителей интервалов управления s_k , $k = 1, 2, \dots, n$.

В дальнейшем потребуется численная оценка этой зависимости в каждой точке реализации ите-

ративной процедуры. Для этого, кроме $x_i(T, s_1, \dots, s_n) = x_{i,0}$, вычисляются величины:

$$x_i(T, s_1 + \Delta, \dots, s_k, \dots, s_n) = x_{i,1},$$

$$x_i(T, s_1, \dots, s_k + \Delta, \dots, s_n) = x_{i,k},$$

$$x_i(T, s_1, \dots, s_k, \dots, s_n + \Delta) = x_{i,n},$$

где Δ — некоторое приращение, $i = 1, \dots, n$. Это позволяет получить оценку элементов матрицы чувствительности:

$$F_{i,k}(\bar{X}_0, \bar{S}) = \frac{x_{i,k} - x_{i,0}}{\Delta} = \frac{\Delta x_{i,k}(T)}{\Delta s_k} \approx \frac{\partial x_i(T)}{\partial s_k}. \quad (2)$$

В дальнейшем эта матрица даст возможность организовать эффективную процедуру вычисления \bar{S}_* — управления, приводящего фазовые координаты в заданную точку \bar{X}_* . Ее элементы $F_{i,k}$ зависят от \bar{X}_0 и \bar{S} , но поскольку \bar{X}_0 остается неизменным в одном цикле вычисления программы, обозначение функциональной зависимости от этого параметра далее опускается.

В итеративной процедуре используются также значения ошибок непопадания фазовых координат в заданные значения в конце реализации программы управления:

$$D_i(\bar{S}) = x_i^* - x_i(T, \bar{S}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

где x_i^* — заданные конечные значения координат.

Введенные обозначения позволяют описать итеративную процедуру вычисления последовательных приближений определителей интервалов:

$$s_k^{(m+1)} = s_k^{(m)} + \frac{\alpha_k}{|F_{k,k}|} D_k^{(m)}(\bar{S}^{(m)}), \quad m = 0, 1, \dots, m. \quad (4)$$

Как следует из этой формулы, устранение ошибки по k -й координате происходит путем изменения k -го определителя интервала управления. Этот прием оказывается весьма эффективным в случае, когда i -я координата является интегралом от $i + 1$ координаты. Но, как видно из рассмотренного в § 2 примера, привлекая дополнительные соображения, можно применять АПУ и в случае, когда это свойство справедливо не для всех координат.

Процедура (4) продолжается до тех пор, пока m не достигнет значения M , при котором

$$D_i^M(\bar{S}^M) = x_i^* - x_i(T^M, \bar{S}^M) \approx 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$



т. е. когда все ошибки не станут требуемой степени малости.

Особо поясним смысл коэффициента α_i , $i = 1, \dots, n$. Главная особенность АПУ состоит в том, что устанавливается определенный порядок подстроек определителей s_k . Подстройка начинается с уменьшения ошибки по самой старшей производной. Очевидно, что ошибка D_n по самой старшей производной зависит от всех s_k , но ее подстройка до выполнения соотношения $D_n \approx 0$ происходит путем изменения только s_n и в первую очередь. Аналогично, подстройка ошибки D_{n-1} происходит вслед за подстройкой ошибки D_n и только путем изменения s_{n-1} при непрерывной подстройке s_n для поддержания соотношения $D_n \approx 0$ и т. д. Для реализации такого порядка настройки компонент \bar{S} и введены коэффициенты $\alpha_i(D_n, \dots, D_{i+1})$, которые удобно рассчитывать по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_n &= 1, \\ \alpha_{n-1} &= \frac{c}{c + |D_n|}, \\ &\dots \\ \alpha_i &= \alpha_{i+1} \frac{c}{c + |D_{i+1}|}, \\ &\dots \\ \alpha_1 &= \alpha_2 \frac{c}{c + |D_2|}. \end{aligned} \quad (6)$$

Постоянную c следует назначать на несколько порядков меньше максимума абсолютных значений фазовых координат объекта, описываемого уравнением (1).

Число итераций зависит от сложности задачи — размерности n , наличия нелинейностей, устойчивости решения и др. Для контроля решения на каждом шаге итерации вычисляется критерий

$$Q(m) = \sum_{i=1}^n |D_i^{(m)}|. \quad (7)$$

Решение задачи обычно начинается при $s_k = 0$, $k = 1, 2, \dots, n$. В процессе последовательного вычисления значений s_k приращение критерия $\Delta = Q^{(m)} - Q^{(m+1)}$ может менять знак. Однако, как показал опыт решения конкретных задач, начиная с некоторого шага приращение Δ становится положительным и уменьшается со скоростью геометрической прогрессии до требуемой степени малости.

2. ВЫЧИСЛЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КОРАБЛЕМ В ИЗВИЛИСТОМ КАНАЛЕ

Применим описанный алгоритм для вычисления управления движением корабля.

Если не учитывать угол дрейфа (боковой снос), приближенно движение корабля можно описать системой уравнений [8]:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \begin{cases} b_1 u & \text{при } |\delta| < b_2 \\ 0 & \text{при } |\delta| = b_2, \end{cases} \\ \dot{\omega} &= -b_3 \omega + b_4 \delta v^2, \\ \dot{\phi} &= \omega, \\ \dot{x} &= v \cos \phi (1 - b_5 |\delta|), \\ \dot{y} &= v \sin \phi (1 - b_5 |\delta|), \end{aligned} \quad (8)$$

здесь x, y — координаты корабля на водной поверхности; ϕ — угол курса; ω — угловая скорость разворота; δ — положение руля; u — сигнал управления рулем, принимает значения $-1, 0, +1$; v — скорость корабля; $b_1 - b_5$ — коэффициенты, значения которых выбраны из условия приближения траекторий к траекториям корабля небольших размеров.

Для более точного описания подвижного объекта система дифференциальных уравнений может быть усложнена включением бокового сноса при разворотах, учетом ветровых возмущений течения водной массы, изменение коэффициентов при изменении глубины и др. Усложнение дифференциальных уравнений и повышение их порядка до 6—7 не вызывает каких-либо принципиальных затруднений.

Схема объекта управления приведена на рис. 1. Символами W с индексами обозначены передаточные функции по соответствующим переменным.

Рассмотрим решение задачи вычисления управления при движении корабля по узкому каналу (рис. 2). Необходимо вычислить управление, обеспечивающее перемещение корабля из точки A в

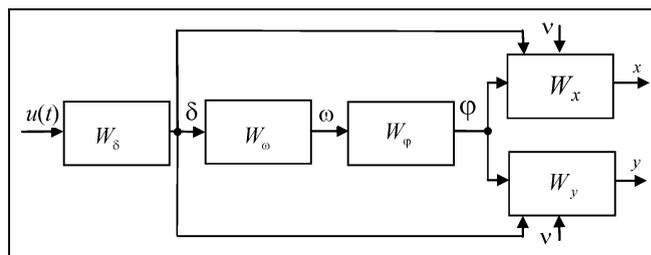


Рис. 1. Структурная схема объекта управления

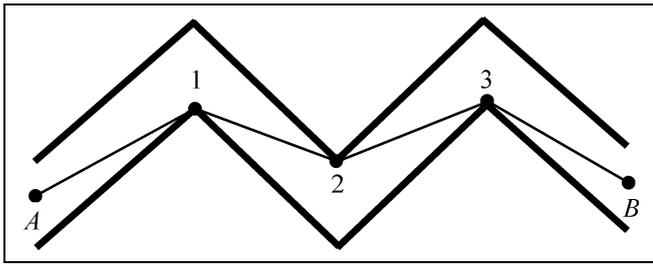


Рис. 2. Схема траектории движения корабля в извилистом канале

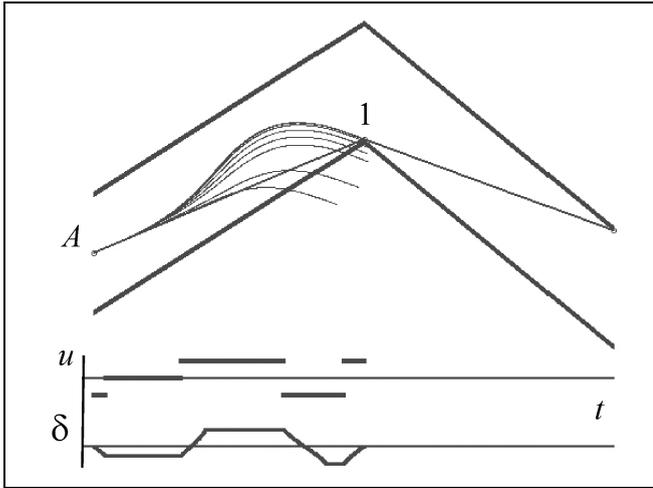


Рис. 3. Схема движения на участке A-I

точку B . Допустимое для плавания пространство ограничено ломаными линиями. Очевидно, кратчайший путь — ломаная $A123B$. Корабль, в силу своей инерционности, не может плыть по этому пути. Построим траекторию, приближающуюся к ломаной и являющуюся решением системы уравнений, описывающей динамику корабля при управлении, найденном посредством АПУ. Рассмотрим более подробно первый этап пути $A - I$.

Пусть известны коэффициенты, входящие в уравнение (8), и заданы координаты начальной точки A $x(0) = x_A$, $y(0) = y_A$, $\delta(0)$, $\omega(0)$, $\varphi(0) = \varphi_0$. Подразумевается, что $|\delta(0)| < b_2$. Известны также заданные значения координат в точках $1, 2, 3, B$.

В отличие от уравнения (1), в данном случае управление влияет на координаты x и y через угол φ (см. выражение (8)), причем координаты изменяются и при $u = 0$. Поэтому принято такое решение по распределению влияния интервалов управления на конечные значения координат: первый по времени интервал управления рассчитывается из условия, чтобы в конце его $y(T) = y_*$. Во время второго интервала управления $u = 0$, а длительность

его устанавливается такой, чтобы $x(T) = x_*$. Это целесообразно, так как производная координаты x пропорциональна величине $\cos\varphi$ а угол φ на втором интервале управления принимает небольшое значение, т. е. $\cos\varphi$ близок к единице, и конечное значение $x(T)$ гораздо больше зависит от длительности интервала, чем от значения угла φ .

Примем следующую стратегию прохождения канала. Пусть номинальное значение курса φ_0 совпадает с направлением $A - I$, а заданный угол φ^* в точке I равен углу следующего отрезка ломанной $I-2$, $\omega^* = 0$, $\delta^* = 0$, $x(T) = x_1^*$, $y(T) = y_1^*$. Поскольку система уравнений (8) имеет пятый порядок, для реализации алгоритма (2)–(5) определения программы управления, приводящего объект в заданную точку, введем обозначения:

$x_1 = y$, $x_2 = x$, $x_3 = \varphi$, $x_4 = \omega$, $x_5 = \delta$, кроме того, примем $u(\tau_2) = 0$, $\tau_2 = |s_2|$.

На рис. 3 показана траектория движения корабля (жирная линия) из точки A в точку I , найденная для случая, когда начальное значение курса φ_0 совпадает с направлением $A - I$. Изображены также

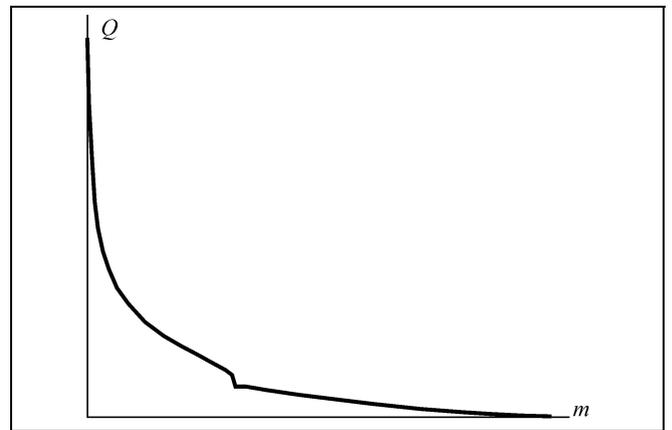
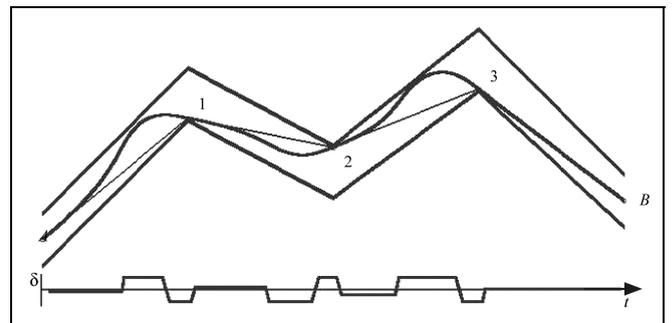

 Рис. 4. Диаграмма изменения критерия $Q^{(m)}$


Рис. 5. Результаты моделирования движения в узком канале



управление u и изменение угла δ поворота руля на интервале $A - I$.

Тонкими линиями показаны траектории корабля при управлениях, найденных в процессе итеративного подбора требуемого программного управления.

На рис. 4 представлено изменение критерия (7) в зависимости от роста числа m итераций.

На участке $I-2$ подобным образом находится следующий фрагмент программы, обеспечивающий перемещение корабля в точку B . Он состоит из пяти интервалов постоянства управляющего воздействия на положение руля. Далее аналогично находятся программы для участков $2-3$ и $3-B$.

Результаты моделирования на ЦВМ всей траектории прохождения канала приведены на рис. 5.

3. РЕШЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ЗАДАЧ

Рассмотренный метод позволяет вычислить траектории движения судна при различных его параметрах и начальных условиях, например, скорости, ограничения на координаты и др. При этом легко выявляются недопустимые варианты, при которых траектория движения выходит за разрешенные пределы.

Рассмотрим маневр с изменением скорости. На рис. 6 приведена траектория корабля, движущегося с постоянной скоростью v из точки A в точку B . Тонкими линиями показана последовательность промежуточных траекторий, вычисляемых итеративным АПУ.

Пусть требуется, чтобы в точке B скорость корабля равнялась нулю и пусть закон, по которому скорость изменяется от v_0 до 0 , имеет вид:

$$v = v_0 \text{ при } 0 < t < T_1,$$

$$\dot{v} = -b_6 v \text{ при } v > v', T_1 < t < T_1 + \tau_1,$$

$$\dot{v} = -b_7 \text{ при } v \leq v', T_1 + \tau_1 < t < T_1 + \tau_1 + \tau_2. \quad (9)$$

Отсюда можно вычислить предварительно общее время снижения скорости $\tau_1 + \tau_2$ и значение $v(\tau)$ для $T_1 < \tau < T_1 + \tau_1 + \tau_2$.

Таким образом, в уравнения (8) входит переменный параметр $v(\tau)$ для $\tau = t - T_1$, где $T_2 = \sum_{i=1}^5 |s_i|$, $T_1 = T_2 - (\tau_1 + \tau_2)$, т. е. T_2 — момент окончания управления.

При первой итерации $T_k = 0$ и $T_1 < 0$. Поскольку отрицательное время не рассматривается, то при $T_1 < 0$ торможение начинается уже при $t = 0$. По мере удлинения программы управления и увели-

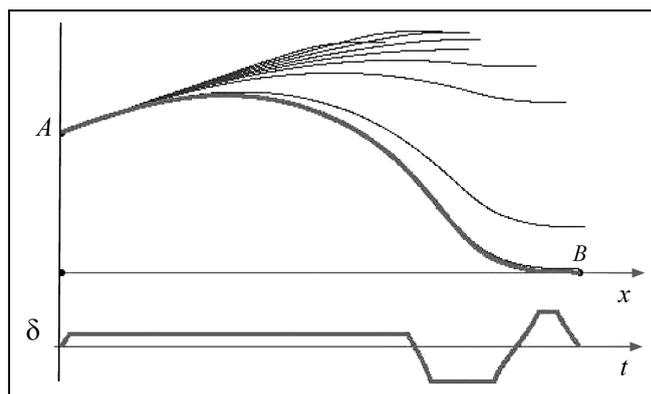


Рис. 6. Траектория движения с постоянной скоростью v без коррекции скорости

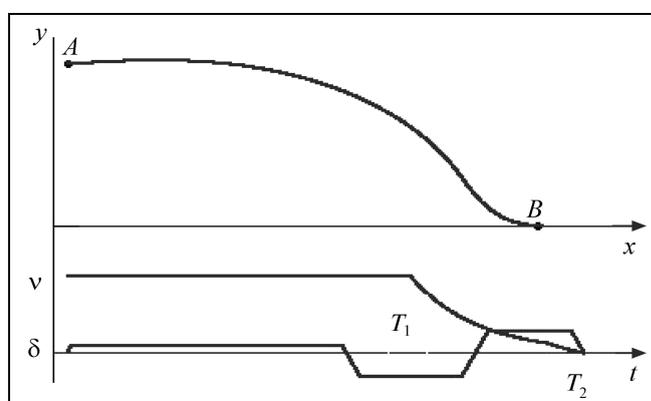


Рис. 7. Траектория корабля с переменной скоростью движения

чения значения T_k величина T_1 становится положительной. Если этого не происходит, то момент торможения ($t = 0$) выбран слишком поздно и алгоритм управления скоростью (10) не позволяет затормозить корабль в точке B . На рис. 7 показана траектория движения корабля с переменной скоростью и изменения скорости и положения руля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что с помощью простой итеративной процедуры можно найти управление, которое эффективно решает задачу перевода корабля из начальной точки в другую с заданными значениями фазовых координат.

Задача управления движением на маневре с переменной скоростью легко распространяется на случай, когда координаты заданной точки меняются с некоторой известной скоростью, т. е. решается задача приближения к плывущему кораблю с дальнейшим синхронным движением.

Отметим, что предложенный итеративный алгоритм нахождения программного управления может применяться для расчета управления, например, при:

— вычислении программы управления объектом, описываемым дифференциальными уравнениями высокого порядка (10—12);

— вычислении программы управления движением перемещения подвешенных нескольких грузов (например, трех) при условии покоя в конечной точке;

— управлении разворотом корпуса спутника при условии покоя присоединенных гибких колебательных элементов в конце управления;

— вычислении программы трехпозиционного управления (+1, 0, -1) с минимизацией суммарного времени активного управления для объектов, обладающих большой инерционностью.

ляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. — М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2000. — 736 с.

4. *Синтез системы квазиоптимального управления механизмом вращения шагающего экскаватора-драглайна методом прогнозирования* / Ф.Б. Гулько и др. // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. — 1984. — № 1. — С. 59—66.
5. *Гулько Ф.Б., Крючков Л.А.* Управление с прогнозированием для неманевренной машины при парном полете // Авиакосмическая техника и технология. — 1998. — № 2.
6. *Шубин А.Б.* Построение управления, приводящего объект в заданную точку (двухточечное программное управление) // Измерения, контроль, автоматизация. — 1989. — Вып. 3.
7. *Харченков Г.Г., Шубин А.Б.* Алгоритмы программного управления ориентацией космического модуля в режиме транспортировки нежесткого груза с прогнозированием движения // Тр. X междунар. науч.-техн. семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». — Алушта, 2001. — С. 253—254.
8. *Першиц Р.Я.* Управляемость и управление судном. — Л.: Судостроение, 1983. — С. 206.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фельдбаум А.А.* Оптимальные процессы в системах автоматического управления // Автоматика и телемеханика. — 1953. — № 6. — С. 712—728.
2. *Математическая теория оптимальных процессов* / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. — М.: Наука, 1976. — 392 с.
3. *Методы классической и современной теории автоматического управления* / Под ред. Н.Д. Егупова. Т. 2. Синтез регу-

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Шубин Александр Борисович — ст. науч. сотрудник,
✉ ashoo@ipu.ru,

Александров Евгений Георгиевич — вед. инженер,

Харченков Георгий Георгиевич — науч. сотрудник,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, ☎ (495) 334-87-20.



С 19 по 21 октября 2010 г. в Москве, в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН состоится X международная конференция «Системы проектирования, технологической подготовки производства и правления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2010)».

Организаторы

- Российская академия наук
- Министерство образования и науки РФ
- Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
- Международная академия информатизации
- Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева
- Московский технический университет связи и информатики
- Ракетно-космическая корпорация "Энергия"
- Американский благотворительный фонд поддержки информатизации, образования и науки
- МГТУ «Станкин»

Тематика конференции

- Организация структур технических и программных средств проектирования и управления. Средства взаимодействия, структуры данных, международные стандарты
- Компьютерная графика и CAD/CAM/PDM-системы в учебных процессах (программы обучения по дисциплинам, методические материалы, тестирование). Средства виртуальной реальности в промышленных системах
- Интегрированные производственные системы и управление технологическими процессами. PDM-системы
- Проектирование в машиностроении и строительстве
- Проектирование в радиоэлектронике

Более подробную информацию можно найти на сайте <http://lab18.ipu.rssi.ru>,

✉ conf18@spm.ipu.ru

☎ (495) 334-93-50, ☎ (495) 334-91-29

Председатель Оргкомитета — д-р техн. наук Артамонов Евгений Иванович
Учёный секретарь — канд. техн. наук Смирнов Сергей Владимирович

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ: МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ (общероссийский семинар)

1 апреля 2010 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН состоялся семинар «Современные методы навигации и управления движением». Семинар проводился в ИПУ РАН уже в пятый раз. С историей и тематикой этих семинаров можно ознакомиться в публикации [1]. В 2010 г. семинар имел тематический подзаголовок «Модели и методы обработки информации в задачах управления движением» и был посвящен 80-й годовщине со дня рождения Рудольфа Эмиля Калмана и 50-й годовщине выхода в свет его работы [2], надолго определившей развитие теории фильтрации в системах автоматического управления и положившей начало огромному циклу работ, посвященных решению линейно-квадратичной задачи в присутствии случайной помехи в виде «белого шума».

Семинар традиционно состоял из двух заседаний — утреннего и вечернего. Всего на семинаре было заслушано 11 докладов, присутствовало более 200 чел.

Открыл **утреннее заседание** руководитель Секции машиностроения и процессов управления ОЭМПУ РАН академик *Е.А. Федосов*, который отметил важность выбранной тематики и пожелал участникам успешной работы. Далее слово было предоставлено директору ИПУ РАН академику *С.Н. Васильеву*. В своем выступлении он привел основные даты жизни и деятельности Р.Э. Калмана, перечислил его основные заслуги и регалии. В частности, было отмечено, что Р.Э. Калман — почетный член Российской академии наук.

В докладе «50 лет фильтру Калмана» заместителя директора ИПУ РАН *Е.Я. Рубиновича* был дан исторический обзор калмановской линейной фильтрации и теории решения линейно-квадратичной гауссовской (LQG) задачи управления. Были проанализированы результаты А.Н. Колмогорова и Н. Винера, которые явились предопределяющими для теории Калмана. Была рассмотрена геометрия

линейного оценивания, рекуррентное оценивание, изложена схема Калмана — Бьюси как для дискретного, так и для непрерывного времени. В докладе также были изложены обобщения схемы Калмана — Бьюси и особо выделены обобщения, сделанные на протяжении 40 лет в ИПУ РАН. Все изложенные в докладе обобщения в основном относились к развитию описания уравнений процесса, и не касались изменения критерия качества, который на протяжении всего процесса оставался интегралом от некоей квадратичной формы.

Доклад *А.П. Курдюкова* (ИПУ РАН) «От теории LQG к минимаксой фильтрации и управлению», напротив, был посвящен построению управления при изменении критериев качества в задаче минимизации влияния внешних возмущений. Были проанализированы наиболее популярные критерии качества в задаче минимизации влияния внешних возмущений, появившиеся за 50 лет со дня опубликования решения LQG-задачи. Так, были изложены решения LEQG (линейной экспоненциально-квадратичной гауссовской) задачи, задачи чувствительности к риску (risk sensitivity problem), задачи H_∞ -оптимизации. Были отмечены достоинства и недостатки решений каждой из рассмотренных задач в случае, когда предположения о характеристиках входного сигнала не совпадали с его реальными характеристиками (например, шум оказывался не «белым» в LQG задаче и, наоборот, в H_∞ -задаче шум оказывался близким к «белому»). Далее были рассмотрены предложенные ранее теории, в которых использовались преимущества каждого из подходов. В завершение была изложена построенная на идеях теории информации теория стохастического робастного управления, которая для линейных дискретных стационарных систем обобщает известные LQG и H_∞ -теории управления и позволяет эффективно решать задачу подав-

ления влияния внешних возмущений при наличии «цветного» шума в системе.

Доклад *В.А. Тупысева* (ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор») «Синтез субоптимальных фильтров калмановского типа с гарантированным качеством оценивания» был посвящен задачам синтеза как редуцированных фильтров калмановского типа, вектор состояния которых меньше вектора состояния оптимального фильтра Калмана, что учитывает ограниченные возможности вычислительных средств, так и фильтров, обеспечивающих гарантированное оценивание основных навигационных параметров в условиях неопределенности в описании возмущений и ошибок измерений. Особенность предлагаемого подхода к синтезу таких фильтров состоит в выборе параметров фильтров калмановского типа таким образом, чтобы матрица $P(t)$, являющаяся решением уравнения Риккати и рассчитываемая в ковариационном канале фильтра, была больше (в смысле неравенства квадратичных форм) действительной ковариационной матрицы $D(t)$ для любого момента времени. В этом случае матрица $P(t)$ может использоваться как мера точности проведенного оценивания. Точность построенного фильтра существенным образом зависит от параметров некоего вспомогательного уравнения. В докладе рассмотрены вопросы выбора этих параметров, обеспечивающих повышение точности фильтра калмановского типа для установленного режима и на начальном этапе оценивания. Выбор таких параметров проведен как для случая синтеза редуцированного фильтра, так и для фильтра, обеспечивающего гарантированное оценивание в условиях интервальной неопределенности параметров формирующих фильтров, используемых для описания возмущений и ошибок измерений.

В докладе *С.П. Дмитриева* и *Д.А. Кошаева* (ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор») «Оценивание сигналов на основе их кусочно-полиномиального представления с учетом ограничений и непрерывной дифференцируемости», который сделал *Д.А. Кошаев*, была сформулирована задача оценки сигнала при структурной неопределенности его стохастической модели. Исходной информацией о свойствах сигнала служит его непрерывная дифференцируемость и соблюдение ограничений на уровень сигнала и его производную. Предложен подход, основанный на кусочно-полиномиальном представлении оцениваемого сигнала и позволяющий формализовать смешанную постановку задачи с нестохастическим описанием полезного сигнала и стохастической моделью помех измерений. Обоснована двухэтапная схема решения сформулированной задачи оценивания сигнала на основе кусочно-полиномиальной модели с учетом ограничений и непрерывной дифференцируемости. На первом этапе с помощью процедуры калмановского типа вырабатываются оценки полиномиальных

коэффициентов и ковариационная матрица их ошибок с соблюдением непрерывной дифференцируемости полезного сигнала, но без учета ограничений. На втором этапе в результате решения задачи условной оптимизации с квадратичной целевой функцией определяются оценки коэффициентов кусочно-полиномиального представления сигнала с учетом заданных ограничений с последующим получением оценок значений самого сигнала. Установлено, что предложенная кусочно-полиномиальная модель достаточно адекватно передает неопределенность информации о свойствах оцениваемого сигнала. Приведены примеры, демонстрирующие преимущество оценивания с учетом ограничений по сравнению с вариантом, где соблюдается лишь условие непрерывной дифференцируемости.

Доклад *В.Д. Дишеля* (ФГУП «НПЦ АП им. академика Н.А. Пилюгина») «Методы высокоточной навигации и ориентации в первой корректируемой инерциально-спутниковой системе управления космических средств выведения» посвящен описанию принципов построения и технического облика интегрированной инерциально-спутниковой системы навигации и ориентации, разработанной для динамических объектов с повышенными требованиями к информационной надежности. В докладе была представлена информационно-страховочная технология интеграции инерциальной и спутниковой навигационных систем (ИСТИНА), положенная в основу данной системы. Теоретической базой технологии ИСТИНА, определяющей ее преимущества, является новая разновидность метода динамической фильтрации. Ее отличает, прежде всего, интервально-пространственный подход к формированию избыточности внешнетракторных (спутниковых) измерений. Кроме того, введенные в состав оцениваемых наряду с полными координатами движения кажущихся координат, совместное их рассмотрение и образование единого пространства оцениваемых кажущихся и действительных координат. Летные испытания интегрированной навигационной системы в составе терминальной системы управления разгонного блока, организованные как попутная фоновая задача системы управления, проводились в тестовом режиме на протяжении шести лет. Благодаря ряду новых качеств данная система стала фундаментом нового поколения корректируемых терминальных систем управления разгонных блоков.

На **вечернем заседании** Семинара председательствовал генеральный директор-главный конструктор ФГУП «ЦНИИАГ» *В.Л. Солунин*.

Первый доклад вечернего заседания *Ю.В. Визильтер*, *С.Ю. Желтов*, *Г.Г. Себряков* (ФГУП «ГосНИИАС») «Автоматизированные системы улучшенного видения для перспективных самолетов гражданской авиации» представлял *Ю.В. Визильтер*. Рассматривались подходы к разработке



аппаратно-программных комплексов «улучшенного видения» (Enhanced Vision Systems, EVS). Доклад был посвящен разработке принципов построения и структуры программно-алгоритмического обеспечения многоспектральной системы технического зрения для улучшенной компьютерной визуализации закабинной обстановки при заходе на посадку, посадке и рулежке по взлетно-посадочной полосе. В докладе рассмотрены: общая структура аппаратного обеспечения системы технического зрения, основные задачи по комплексированию и обработке многоспектральной видеoinформации и автоматизированного обнаружения элементов закабинной обстановки, а также основные алгоритмические подходы к решению этих проблем. Описаны методы автоматического обнаружения взлетно-посадочной полосы на изображениях, регистрируемых с борта самолета в режимах захода на посадку и посадки, основанные на различных модификациях преобразования Хафа. Обоснован способ автоматического обнаружения препятствий на взлетно-посадочной полосе, основанный на вычислительно эффективной реализации метода дифференциального ортофото.

В докладе *Г.Г. Себрякова, В.Н. Сошников, К.В. Обросова* (ФГУП «ГосНИИАС») «Принципы построения и алгоритмы бортовых оптико-радиолокационных систем автоматического обнаружения, идентификации и сопровождения групп наземных объектов для навигации и высокоточного наведения», который сделал *В.Н. Сошников*, были представлены результаты разработки принципов построения, методов и алгоритмов систем высокоточного наведения и навигации, обеспечивающих автоматический анализ 3D-сцен со сложной структурой, автоматическое обнаружение, идентификацию и сопровождение групп наземных объектов с помощью оптико-радиолокационных систем. Решение этих задач позволяет автоматизировать процессы навигации, целераспределения, целеуказания и наведения при групповом применении летательных аппаратов (ЛА). В настоящее время эти задачи не решены, и разработка методов их решения весьма актуальна для повышения эффективности применения рассматриваемого класса ЛА. В докладе кратко изложены результаты исследований по четырем направлениям:

- экспериментальные исследования изображений типовых сцен для многоспектральных оптико-электронных визирных и локационных систем;
- разработка принципов построения оптико-радиолокационных систем и сопоставления наблюдаемых и эталонных сцен на основе 3D-портретов и космоснимков;
- разработка алгоритмов бортовых оптико-электронных систем для автоматического обнаружения, идентификации и сопровождения группы наземных объектов;

- разработка алгоритмов определения навигационных параметров ЛА по результатам наблюдения группы наземных объектов с известными координатами с помощью оптико-электронной визирной системы переднего обзора.

В докладе *А.П. Кирпичникова* (ИПУ РАН) «Повышение безопасности систем управления с учетом тенденций в электронике», тема которого по признанию самого докладчика находится несколько в стороне от тематики Семинара, были изложены философские вопросы современного проектирования систем управления объектами критического приложения. Современное проектирование представляет собой компромисс между прогрессивными и экономически эффективными методами и безопасностью результата, который должен быть решен в пользу последнего. На примере разработки нового блока безопасности поезда московского метрополитена продемонстрирована идеология и основные принципы проектирования современной системы с высоким уровнем безопасности.

Доклад *С.В. Соколова* (Ростовский государственный университет путей сообщения) и *В.А. Погорелова* (Ростовский военный институт ракетных войск им. М.И. Неделина) «Выбор оптимальной конфигурации и стохастическая оценка состояния автономных бесплатформенных навигационных систем» (доклад делал *В.А. Погорелов*) был посвящен анализу путей решения задачи синтеза универсальных помехоустойчивых навигационных алгоритмов комплексированной навигационной системы на основе единых принципов обработки измерительной информации в каждой навигационной структуре и решению проблемы оптимального управления оценками вектора состояния комплексированной навигационной системы в условиях действия возмущающих факторов.

В докладе *Ю.В. Болотина, А.А. Голована* (МГУ) и *Е.В. Каршакова* (ИПУ РАН) «Стохастические модели в алгоритмах обработки измерений аэрогеофизических систем» (докладчик *Е.В. Каршаков*) были представлены некоторые результаты, полученные при обработке данных аэрогеофизических систем разного типа. Общим при решении задач по обработке данных аэрографических систем является стохастический подход к моделированию аномального поля. На основе стохастической модели поля в пространстве строится его стохастическая модель во времени вдоль линии полета. Эта модель описывается формирующим фильтром, который включается в общую структуру уравнений состояния системы при построении фильтра или сглаживателя Калмана. При выполнении аэрогеофизических измерений характер аномалий заранее, как правило, не известен. Поэтому на практике используется одна из эвристических моделей поля. В качестве примера работы описанных алгоритмов приводятся результаты вычисления верти-

кальной составляющей аномалии силы тяжести на линии полета. Оказывающие влияния на показания гравиметра силы инерции, ошибки построения приборной вертикали и другие факторы определяются при совместной обработке данных инерциальной навигационной системы и спутниковой навигационной системы, работающей в дифференциальном режиме. Приведены примеры применения предложенного метода обработки данных летных испытаний. Данные аэрогравиметрии получены при помощи системы МАГ-1 («Гравиметрические технологии», Россия) на борту самолета Ан-26. Аэромагнитометрическая система была установлена на борту самолета Ан-2 и включала в себя квантовый датчик Cs-3 («Scintrex», Канада).

Уже после утверждения программы Семинара к организаторам поступил доклад *В.А. Садовниченко* и *В.В. Александрова* (МГУ) «Информационные процессы в инерциальных механорецепторах, персональная ориентация в пространстве и ее коррекция с помощью навигационных систем». Было решено включить этот доклад в программу. В докладе, который сделал *В.В. Александров*, были представлены результаты исследований группы математиков МГУ, которые вместе с мексиканскими физиологами в конце 1990-х гг. начали совместную работу в филиале лаборатории, созданной Винером и Ро-

зенблютом в 1950-х гг., по математическому моделированию информационных процессов в инерциальных биосенсорах.

Как отметил председательствовавший на вечернем заседании *В.Л. Солунин*, семинар вновь привлёк внимание широкого круга специалистов и было высказано общее мнение — продолжать организацию такого рода семинаров на базе ИПУ РАН и далее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов Б.В., Курдюков А.П., Гольдин Д.А. Общероссийский семинар «Современные методы навигации и управления движением: информационно-управляющие системы автономных движущихся объектов» // Проблемы управления. — 2009. — № 4. — С. 80—82.
2. Kalman R.E. Contributions to the theory of optimal control // Bol. Soc. Mat. Mexicana. — 1960. — N 5. — P. 102—119.

Б.В. Павлов, Д.А. Гольдин

Павлов Борис Викторович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, ☎(495) 334-93-51, ✉ pavlov@ipu.ru,

Гольдин Дмитрий Алексеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ☎(495) 334-89-51, ✉ goldind@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.



Александр Семенович РЫКОВ 1945—2010

2 мая 2010 года ушёл из жизни известный учёный в области системного анализа, методов оптимизации и принятия решений, заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, член редколлегии журнала «Проблемы управления», профессор Александр Семёнович Рыков.

Его научная деятельность началась в 1969 г. в Институте проблем управления АН СССР после окончания Московского физико-технического института. Затем он работал во Всесоюзном научно-исследовательском институте системных исследований, а с 1982 г. до последних дней своей жизни — в Московском институте стали и сплавов.

Профессор А.С. Рыков является автором нового класса поисковых методов оптимизации — методов деформируемых конфигураций. Им предложены формальные математические модели принятия решений при различных видах неопределенности, разработаны специальные универсальные комбинированные критерии для снятия неопределенности, учитывающие степень доверия к априорной информации лица, принимающего решения, различные подходы и методы преодоления многокритериальности задач принятия решений. Результаты его научных исследований нашли широкое практическое применение на многих промышленных предприятиях.

Как учёный, А.С. Рыков известен далеко за пределами нашей страны, он многократно приглашался для чтения лекций во многие университеты и научные коллективы мира. Профессор А.С. Рыков — автор более 200 научных трудов, за последние годы он выпустил семь монографий, 10 учебных пособий, опубликовал серию статей в научных журналах, в том числе и в журнале «Проблемы управления». В 2009 г. вышел из печати его фундаментальный труд «Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации». Много времени и сил отдавал педагогической и научно-организационной работе, активно участвовал в работе редколлегии журнала «Проблемы управления».

Трудно поверить, что Александра Семёновича уже нет среди нас — ещё в прошлом номере нашего журнала мы поздравляли его с 65-летием...

В памяти коллег и друзей Александр Семёнович навсегда останется как талантливый учёный, незаурядный педагог, скромный и доброжелательный человек, неутомимый труженик и примерный семьянин, надёжный товарищ, всегда готовый помочь и словом, и делом.

*Сотрудники Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Редакционная коллегия
Редакция*



CONTENTS & ABSTRACTS

COGNITIVE MAPS MODELLING COMPUTER SYSTEMS (APPROACHES AND METHODS) 2

Kulinich A.A.

Computer systems of decision-making support in ill-structured dynamic situations, based on modeling of the expert knowledge presented by cognitive maps are considered. Methods and approaches of the basic functional subsystems realization of decision-making support systems of this class are analysed.

Keywords: cognitive map, «soft» system analysis, modeling system architecture, parameterization, verification, correction.

SOLUTION OF THE GENERALIZED JOHNSON PROBLEM WITH CONSTRAINTS ON THE SCHEDULE AND TIME OF THE MACHINE. PART I. EXACT SOLUTION METHODS. 17

Zak J.A.

The problem of finding an optimal permutation which determines the sequence of a set of tasks in a fixed and equal for all tasks sequence of execution of certain works on different machines, is generalized to the case when the restrictions on the start and end time both for execution of individual tasks, and the time of equipment work are set. The properties of admissible and optimal sequence of tasks are studied. The formulas for calculating the lower limit of the total length of the schedule are presented. Exact and approximate methods for solving the problem are developed.

Keywords: flow-shop problem, optimal schedule, the sequence of assignments, restrictions on the start and end time.

NONLINEAR NOISE IMMUNITY DIFFERENTIATORS 26

Gulyaev S.V., Shublazde A.M., Kyznetsov S.I., Krotov A.V., Olshvang V.R., Malakhov V.A.

The paper proposes the method for solution of a differentiation problem, allowing to receive an estimation derivative Gaussian stationary signals close to optimum by standard deviation criterion if spectral density useful signals and noise are known to within level. Realization of this method with the use of nonlinear dynamic systems organized in a special way is considered. The comparative estimation of quality indicators of results of differentiation nonlinear differentiator, linear and relay differentiators is presented.

Keywords: differentiation, adaptation, optimality, Gaussian noise.

AN ENTERPRISE INFORMATION SYSTEM AS A MEANS TO PROVIDE AN ADAPTIVITY OF A FIRM IN AN UNSTABLE ENVIRONMENT 30

Kolomoets A.A., Klochkov V.V.

The paper presents the economical and mathematical model of a company with an enterprise information system (EIS) in the control loop. Indicators of EIS quality and efficiency are suggested. The task of EIS parameters optimization based on the company profit maximization is considered. The approaches developed are shown by an example of air ticket sold registration system.

Keywords: enterprise information system, economical efficiency, simulation, limited rationality, control loop, adaptivity.

METHODS AND TOOLS FOR OPTIMIZATION OF HOLDING COMPANY DEVELOPMENT 38

Goroshnikova T.A., Tsvirkun A.D.

Problems of control of a holding company development and methods of optimization of its development with use of a complex of interconnected models of various type (optimization, simulation, optimization-simulation) are considered. The developed tools for optimization of a holding company development are presented and illustrated by an example.

Keywords: development control, holding company, investment analysis, investment projects, complex estimation, optimization-simulation approach.

COMPANY MANAGEMENT SYSTEM ESTIMATION ON THE BASIS OF ADAPTIVE CORRELATION TO THE ENVIRONMENT 45

Masaev S.N., Dorrer M.G.

The method of express audit of the structure and indicators of a company business processes based on the calculation of simple correlation between historic series of expenses is proposed.

Keywords: correlation, adaptation, process, system analysis, management.

CAUSAL COMPLEXES OF INTERACTIONS IN PRODUCTION PROCESSES 51

Reztchikov A.F., Tverdokhlebov V.A.

For the description of interrelations and interactions of the homogeneous processes, forming production processes, the discrete determined models in the form of causal complexes are proposed. The paper develops fundamentals of construction of the complexes, new structures of sections and rules of a composition of sections and complexes. The formal language for representation of a structure and a complex as a whole is proposed. It is noted, that the developed means allow to represent complexes by hierarchical structure with consecutive transition from the rough and approximate description of production process to its representation by model with the set depth, completeness and accuracy.

Keywords: cause, consequence, causal relationship realization conditions, group of cause, group of consequence, complex of causal relationship, discrete process, interaction of processes.

INCREASE OF CONTROL EFFICIENCY OF ELECTROTHERMAL PROCESSES USING THE COMPUTER TRAINING COMPLEXES. 60

Ershova O.V.

Issues of development of computer training complexes for personal learning and increase of control efficiency of electrothermal process on the example of calcium carbide manufacture are considered. The structure of complexes is proposed, the functional components are characterized for acquisition of effective control skills and the knowledge check.

Keywords: computer training complexes, trainee instructor, increase of control efficiency by electrothermal process.

THE ORGANIZATION OF HOMOGENEOUS COMPETING PROCESSES AT THE DISTRIBUTED CONVEYOR PROCESSING 66

Pavlov P.A.

Formulas and estimations of minimum general time of performance of the homogeneous distributed competing processes are received. The comparative analysis of modes of interaction of processes, processors and blocks of the structured program resource taking into account additional system expenses is carried out.

Keywords: distributed process, program resource, homogeneous system, asynchronous mode, synchronous mode, structurization, parallelism.

NEAR OPTIMAL MANAGEMENT TRAJECTORY OF OBJECT MOVEMENT 73

Shubin A.B., Alexandrov E.G., Harchenkov G.G.

The problem of calculation of the control transferring the ship from one point of water space in a final point with set phase coordinates and speed is considered with the use of model of the ship described by the system of differential equations of the fifth order. The paper shows that this requires only five reruns of the wheel, calculated by means of algorithm of programmed control. Results of modeling of trajectories on PC, including movement on the winding narrow channel and movement with variable speed are presented.

Keywords: optimum control of mobile object, ship model, differential nonlinear equation, management calculation, trajectory modeling, movement in the narrow channel.

MODERN METHODS OF NAVIGATION AND MOVEMENT CONTROL: MODELS AND METHODS OF INFORMATION PROCESSING IN THE TASKS OF MOVEMENT CONTROL. 79

VASILY NIKOLAEVICH NOVOSELTSEV
(on the occasion of 75th anniversary) 84

Василий Николаевич НОВОСЕЛЬЦЕВ (к 75-летию со дня рождения)

13 мая 2010 года исполнилось 75 лет члену редколлегии журнала «Проблемы управления», известному ученому в области применений теории управления к анализу биологических систем, академику Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, доктору технических наук, профессору Василию Николаевичу Новосельцеву.

В.Н. Новосельцев работает в Институте проблем управления с 1957 года, куда он студентом Московского физико-технического института был направлен на дипломную практику в группу А.М. Петровского. После окончания МФТИ в 1959 г. он продолжает работать в Институте и сейчас, начав с должности инженера и став главным научным сотрудником.

В.Н. Новосельцев — один из зачинателей моделирования биологических систем в СССР и России. Монография «Моделирование физиологических систем организма» (в соавторстве с М.П. Сахаровым, Е.Ш. Штенгольдом и знаменитым кардиохирургом В.И. Шумаковым), вышедшая в 1971 году в издательстве «Медицина», стала второй российской книгой на эту тему после работы академика В.В. Парина и д-ра мед наук Р.М. Баевского. В.Н. Новосельцев занимался биокибернетикой и вопросами работы человека в экстремальных условиях — в космосе и под водой. Он разработал теорию гомеостаза организма, составившую основу монографии «Теория управления и биосистемы» (1978 г.). Его модель гомеостаза оказалась адекватным инструментом исследования физиологических систем, работающих в техническом окружении. Это позволило развить начала нового научного направления — инженерной физиологии, отраженного в монографии «Инженерная физиология и моделирование систем организма», вышедшей в 1987 г. Завершила цикл работ по искусственным внутренним органам человека (искусственное сердце, искусственная поджелудочная железа) и техногенной среде обитания (искусственная терморегуляция) книга «Организм в мире техники» (1989 г.).

Занявшись в 1990-х гг. применениями теории управления в токсикологии, В.Н. Новосельцев создал модель естественных технологий организма. Эта модель, представляющая собой математическую трактовку концепции «естественных технологий» академика А.М. Уголева, была применена для анализа ос-



рых отравлений хлором, аммиаком, ядами бледной поганки и полонием. Все эти яды представляют опасность для жизни человека, так что при моделировании приходится исследовать процессы как поддержания жизнедеятельности, так и наступления смерти. В 1998 г. В.Н. Новосельцевым разработан междисциплинарный подход к моделированию сложных систем, обобщивший положения модели естественных технологий организма.

После 1998 г. В.Н. Новосельцев активно занимается геронтологией — наукой о долголетии и продлении жизни. При его активном участии эта наука постепенно обретает все более выра-

женные черты математизации, что отражено в коллективной монографии «Геронтология *in silico* — становление новой дисциплины» (2007 г.). Совместно с А.И. Яшиным и Ж.А. Новосельцевой он разработал гомеостатическую модель старения, воплощающую принципы теории окислительных повреждений животного организма, и получил оценки возможного долголетия человека в зависимости от его образа жизни (111—133 года у мужчин и 102—123 года у женщин).

В.Н. Новосельцев ведет активную научную жизнь. Он участвовал в работе множества Международных конференций (в том числе с пленарным докладом на IX Всемирном конгрессе ИФАК — в соавторстве с В.И. Шумаковым и В.А. Викторковым), в разные годы преподавал в Московском физико-техническом институте, Московском высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана, Московском институте радиоэлектроники и автоматики. Десять его учеников защитили кандидатские диссертации и один — докторскую. В.Н. Новосельцев работал в разных странах — Польше, Германии, США и Литве, рецензировал статьи в ведущих мировых журналах «Applied Physiology» и «Experimental Gerontology».

Кроме основных направлений научной работы, В.Н. Новосельцев занимался вопросами нарушения восприятия у человека в связи с техногенными и природными явлениями, публиковался в научно-популярных журналах «Знание — сила», «Наука в России» и «Квант».

В.Н. Новосельцев продолжает трудиться на благо отечественной науки, он полон творческих планов и энергии.

***Дорогой Василий Николаевич! Поздравляем Вас с юбилеем и желаем здоровья на многие годы!
Творческих Вам успехов!***

*Сотрудники Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Редакционная коллегия
Редакция*