

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 5 (146)

май

2013

**Редакционный совет:**

БОЛОТНИК Н. Н.  
 ВАСИЛЬЕВ С. Н.  
 КАЛЯЕВ И. А.  
 КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.  
 КУЗНЕЦОВ Н. А.  
 ЛЕОНОВ Г. А.  
 МАТВЕЕНКО А. М.  
 МИКРИН Е. А.  
 ПЕШЕХОНОВ В. Г.  
 РЕЗЧИКОВ А. Ф.  
 СЕБРЯКОВ Г. Г.  
 СИГОВ А. С.  
 СИРОТКИН О. С.  
 СОЙФЕР В. А.  
 СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.  
 ФЕДОРОВ И. Б.  
 ЧЕНЦОВ А. Г.  
 ШЕРБАТЮК А. Ф.  
 ЮСУПОВ Р. М.

**Главный редактор:**  
 ФИЛИМОНОВ Н. Б.

**Заместители гл. редактора:**

ПОДУРАЕВ Ю. В.  
 ПУТОВ В. В.  
 ЮЩЕНКО А. С.

**Ответственный секретарь:**

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

**Редакционная коллегия:**

АЛЕКСАНДРОВ В. В.  
 АНТОНОВ Б. И.  
 АРШАНСКИЙ М. М.  
 БУКОВ В. Н.  
 ВИТТИХ В. А.  
 ВОСТРИКОВ А. С.  
 ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.  
 ГРАДЕЦКИЙ В. Г.  
 ИВЧЕНКО В. Д.  
 ИЛЬЯСОВ Б. Г.  
 КОЛОСОВ О. С.  
 КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.  
 КУЗЬМИН Н. Н.  
 ЛЕБЕДЕВ Г. Н.  
 ЛОХИН В. М.  
 ПАВЛОВСКИЙ В. Е.  
 ПРОХОРОВ Н. Л.  
 РАПОПОРТ Э. Я.  
 СЕРГЕЕВ С. Ф.  
 ТИМОФЕЕВ А. В.  
 ФИЛАРЕТОВ В. Ф.  
 ФРАДКОВ А. Л.  
 ФУРСОВ В. А.  
 ШАЛОБАЕВ Е. В.  
 ЮРЕВИЧ Е. И.

**Редакция:**

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Афанасьев В. Н., Окунькова Е. В.** Гарантированное управление нелинейным объектом (на примере ядерного реактора на тяжелой воде) . . . . . 2  
**Арановский С. В., Бобцов А. А., Пыркин А. А.** Алгоритм управления линейным параметрически не определенным объектом с входным запаздыванием и неизвестным постоянным возмущением . . . . . 5  
**Куцый Н. Н., Лукьянов Н. Д.** Параметрическая оптимизация АИМ-систем с помощью генетического алгоритма . . . . . 10

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

- Калитаев А. Н., Тутарова В. Д.** Параметрическая идентификация модели внешнего теплообмена заготовки в сортовой машине непрерывного литья заготовок . . . . . 14  
**Титов В. С., Бобырь М. В., Анциферов А. В.** Адаптивный мультисетевой алгоритм нечетко-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ . . . . . 18

### РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Письменная Е. В., Митрофанов И. Е., Комаров П. А., Аведиков Г. Е.** Система управления движением мобильного робота по произвольным траекториям . . . . . 24  
**Филаретов В. Ф., Губанков А. С.** Синтез системы формирования программных сигналов для электроприводов многозвенных манипуляторов . . . . . 30

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

- Кондратьев В. А.** Сравнительный анализ динамических сил электромагнитного привода . . . . . 35  
**Когут А. Т., Лаврухин А. А.** Приближенные алгоритмы траекторного управления в системах диагностирования технического состояния электромеханических объектов подвижного состава . . . . . 40

### ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ

- Ченцов А. А., Ченцов А. Г., Ченцов П. А.** Задачи маршрутизации с ограничениями и сложными функциями стоимости . . . . . 45  
**Алгулиев Р. М., Пашаев А. Б., Панахов Н. А.** О задаче определения пунктов для установки передающих станций цифрового телевидения . . . . . 53

### Журнал в журнале "УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Клейменова Е. М., Скобелев П. О., Ларюхин В. Б., Майоров И. В., Косов Д. С., Симонова Е. В., Царев А. В., Феоктистов А. Л., Полончук Е. В.** Мультиагентная технология адаптивного планирования и управления проектами НИР и ОКР в аэрокосмических приложениях . . . . . 58  
**Лавровский Э. К.** Об одном типе задач оптимальной переориентации орбит . . . . . 64  
**Contents** . . . . . 69

*Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования*

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:  
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: [mech@novtex.ru](mailto:mech@novtex.ru)

# ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



## Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



**Главный редактор:**

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

**Ответственный секретарь:**

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

**Редакционная коллегия:**

АЛЕКСЕЕВ В. В.  
БАРАНОВ Л. А.  
БЕЛОКОНОВ И. В.  
БУКОВ В. Н.  
ВАСИЛЬЕВ В. И.  
ГОДУНОВ В. А.  
ГУРЕВИЧ О. С.  
ГУРСКИЙ Б. Г.  
ЕФИМОВ В. В.  
ЗАЙЦЕВ А. В.  
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.  
НЕСТЕРОВ В. А.  
ОХТИЛЕВ М. Ю.  
ПАНКРАТОВ В. М.  
РАСПОПОВ В. Я.  
САБО Ю. И.  
СТЕПАНОВ О. А.  
СОЛДАТКИН В. М.  
ФИЛИМОНОВ Н. Б.  
ХИМЕНКО В. И.  
ЧЕБУРАХИН И. Ф.  
ШИРЯЕВ В. И.  
ШКОЛИН В. П.

**Редакция:**

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

- Клейменова Е. М., Скобелев П. О., Ларюхин В. Б., Майоров И. В., Косов Д. С., Симонова Е. В., Царев А. В., Феоктистов А. Л., Полончук Е. В.**  
Мультиагентная технология адаптивного планирования и управления проектами НИР и ОКР в аэрокосмических приложениях . . . . . 58
- Лавровский Э. К.**  
Об одном типе задач оптимальной переориентации орбит . . . 64

**Е. М. Клейменова**<sup>1</sup>, зам. руководителя,  
Elena.Kleimenova@rsce.ru,

**П. О. Скобелев**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,  
skobelev@smartsolutions-123.ru,

**В. Б. Ларюхин**<sup>3</sup>, директор по разработкам,  
vlarukhin@smartsolutions-123.ru,

**И. В. Майоров**<sup>3</sup>, ведущий специалист  
исследовательского отдела,  
imayorov@smartsolutions-123.ru,

**Д. С. Косов**<sup>3</sup>, аналитик,  
kosov@smartsolutions-123.ru,

**Е. В. Симонова**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, ведущий аналитик,  
simonova.elena.v@gmail.com,

**А. В. Царев**<sup>3</sup>, генеральный директор,  
at@anarun.net,

**А. Л. Феоктистов**<sup>1</sup>, руководитель,  
Alexander.Feoktistov@rsce.ru,

**Е. В. Полончук**<sup>4</sup>, руководитель сектора отдела,  
Evgeny.Polonchuk@rsce.ru

<sup>1</sup> НТЦ-5Ц ОАО "РКК "Энергия",

<sup>2</sup> ИПУСС РАН,

<sup>3</sup> НПК "Разумные решения",

<sup>4</sup> НТЦ "Корпоративные информационные технологии"

## Мультиагентная технология адаптивного планирования и управления проектами НИР и ОКР в аэрокосмических приложениях

*Рассматривается метод адаптивного планирования для управления проектами НИР и ОКР в аэрокосмических приложениях, основанный на использовании мультиагентных технологий.*

**Ключевые слова:** управление проектами, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, адаптивное планирование, мультиагентные технологии, реальное время

### Введение

Задача управления проектами в сфере научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ особенно актуальна для крупных корпораций, работающих в аэрокосмической отрасли и выпускающих сложные, инновационные, уникальные технические изделия.

Одной из самых серьезных проблем в управлении проектами является планирование творческих работ и ресурсов предприятия. Для того чтобы быть успешными на современном глобальном рынке, эти предприятия должны предельно консолидировать все творческие, волевые и другие личностные ресурсы людей. Один из подходов к решению этой задачи связан с развитием интересубъективной те-

рии управления коллективами людей, в которых особую роль приобретают лидеры-акторы, способные брать на себя ответственность и проявлять социальную самоорганизацию [1].

Для планирования работы акторов нужны новые методы, требующие изменения подходов к планированию, например, новые задачи могут вырабатываться и ставиться "снизу", а не "сверху", как это привыкли делать начальники; исполнитель получает право выбирать и менять параметры задачи; план может многократно изменяться и согласовываться в течение дня; в зависимости от развития ситуации меняется распределение ресурсов; оплата каждого исполнителя назначается по результатам выполненной работы с учетом внутреннего рынка предприятия, важности задач и т. д.

На текущий момент существует множество традиционных методов и средств планирования ресурсов (*Microsoft Project, Primavera* и др.), однако они ориентированы на классические централизованные, иерархические подходы "сверху вниз" и не обеспечивают согласованную, открытую к изменениям, адаптивную и гибкую работу в реальном времени.

В данной статье авторы предлагают метод адаптивного планирования ресурсов для решения задачи управления проектами НИР и ОКР, который реализует важные принципы рассматриваемого интересубъективного подхода на основе мультиагентных технологий, получающих в последнее время все большее развитие и применение для управления ресурсами в реальном времени [2–3].

### 1. Обзор существующих методов планирования

Планирование проектов в настоящее время — широко востребованная и стремительно развивающаяся отрасль автоматизации. Однако, в сущности, задача планирования проектов — это распределение задач и отдельных работ по исполнителям, что математически эквивалентно задаче построения производственных планов предприятий. Поэтому методы, давно развивающиеся для планирования производства и построения производственных расписаний, с успехом могут применяться и к задачам планирования проектов. В настоящее время такие системы планирования развиваются в двух направлениях — традиционном централизованном и децентрализованном.

Традиционное централизованное планирование основано на мощных математических методах: линейном и нелинейном программировании, математическом и динамическом программировании, дискретной оптимизации, программировании в ограничениях, методах AI-нейросетей, генетических алгоритмах.

Недостатки централизованного планирования — детерминированность и сложность учета быстроменяющихся условий, отсутствие достоверной информации о текущей ситуации, потеря адекватности расписаний с течением времени, что обуслов-

лено принципиально недостаточной достоверностью исходных данных и сложностью систем, состоящих из большого числа подсистем.

Преодоление этих недостатков возможно за счет использования распределенного подхода, в частности, мультиагентного подхода к планированию.

### 1.1. DCOP-алгоритмы

*Distributed Constraint Optimization Problem (DCOP)* — это математическая дисциплина, описывающая теорию применения агентов к задачам оптимизации с распределенными ограничениями. *DCOP* является обобщением методологии оптимизация с ограничениями (*Constraint optimization problem (COP)*) применительно к распределенным системам [4].

За последние 10 лет разработан ряд базовых алгоритмов — *Asynchronous Distributed Constraint Optimization (ADOPT)*, *Optimal Asynchronous Partial Overlay (OptAPO)*, *Distributed Pseudo-tree Optimization (DPOP)*, *Asynchronous Backtracking (ABT)*, которые учитывают сетевую структуру задачи. Общий принцип таких алгоритмов — децентрализация в принятии решений, динамический характер формирующихся решений и постепенное стремление к равновесию, когда при наличии внешних воздействий мультиагентная система находит новое положение равновесия. Практически все децентрализованные алгоритмы применяют "возврат" (*backtracking*, *ABT*-алгоритмы), когда путем обмена сообщениями некоторые агенты получают противоречия в ограничениях, вследствие чего происходит возврат к предыдущему состоянию задачи и корректировка решения. Алгоритмы различаются также по способу построения решения. При использовании подхода "сверху вниз" (*ADOPT*-алгоритм) задача декомпозируется на более простые подзадачи, которые затем решаются агентами. Согласно другому подходу (*OptAPO*) решения строятся "снизу вверх", а затем сливаются непротиворечивым образом. Часто используется механизм "распространения ограничений вперед". Однако недостатком распределенных алгоритмов является экспоненциальный рост либо числа сообщений, которыми обмениваются агенты, либо их объема [5, 6].

### 1.2. Роевая оптимизация в задачах планирования

Одним из современных многообещающих направлений в производственном планировании является применение метафоры "роя" агентов (*Particle Swarm Optimization (PSO)*). Роевая оптимизация (РО) — это эвристические методы, построенные по аналогии с социальным поведением и коммуникациями в природных объектах, например, стаях птиц или рыб, колониях муравьев или пчел. Информация о состоянии агентов роя, называемых в данной интерпретации "частицами", распространяется через взаимодействия между всеми агентами и позволяет найти лучшее состояние агента в про-

странстве состояний. В РО каждая "частица" движется через многомерное пространство с некоторой "скоростью", которая постоянно меняется, приводя к изменениям положения в пространстве состояний. Изменения скорости и положения зависят от значения целевой функции конкретного агента и состояния соседних агентов. Агент-"частица" движется от своей наилучшей предыдущей позиции к наилучшей позиции среди всех "частиц" роя. РО предполагает, как и все эвристические алгоритмы, наличие свободных настраиваемых параметров, например, коэффициентов связи в конкретной топологии системы [7—9].

### 1.3. Рыночный подход

Наиболее широкое распространение в мультиагентном планировании получил рыночный подход, в котором агенты работ и агенты ресурсов посредством обмена сообщениями участвуют в своеобразных торгах, в результате которых динамически строится расписание, выгодное всем участникам.

Распределенное (децентрализованное) планирование основано на следующих принципах, выполнение которых приводит к достижению Парето-оптимальности:

- агенты, стремящиеся к своей выгоде, создают решения с локальной, частной информацией без детальных сведений о частной информации и о стратегиях других агентов;
- данные, которыми обмениваются агенты, должны быть минимально необходимыми;
- результат должен достигаться за разумное время с разумными вычислительными затратами;
- если агент может улучшить свое состояние без ущерба для других агентов, он делает это.

Рыночный подход (например, через максимизацию прибыли каждого агента или, в более сложном случае, через аукционы) вполне способен обеспечить эти условия. Рынки по своей природе децентрализованы. Агенты принимают решения о заявках и ценах, соотносясь со своим собственным представлением. Объем сообщений ограничивается заявками, ценами и рыночным механизмом согласования, в результате которого агенты могут приходиться к взаимоприемлемому соглашению, что в идеале приводит к равновесию и Парето-оптимальности. В мультиагентных системах (МАС) используются распределенные рыночные механизмы, свойства агентов настраиваются через атрибуты на конкретную предметную область.

В МАС реализуется возможность задать практически любую логику выбора действий агента на основании его виртуальной прибыли в системе "торгов" за ресурсы [10].

Мультиагентные системы, применяющие "рыночный" подход к планированию, обладают наибольшим потенциалом для реализации в распределенных системах планирования проектной деятельности в режиме реального времени.

## 2. Метод адаптивного планирования ресурсов

Предлагаемый метод адаптивного планирования состоит в том, чтобы моделировать процесс распределения ресурсов и построения сложных расписаний через сопряженное взаимодействие в сетях потребностей и возможностей (ПВ-сетях) участников этого процесса, которые по определению имеют различные цели, предпочтения и ограничения [11—13].

При этом каждый участник процесса планирования обладает потребностями (например, задача хочет быть успешно запланированной с учетом ограничений проекта) и возможностью (например, исполнитель обладает умениями для выполнения задачи). В результате каждой потребности или возможности реального мира управления проектами НИР и ОКР может быть поставлен в соответствие программный агент. Программные агенты, способные действовать от лица и по поручению ресурсов, представляющих потребности и возможности, в итоге формируют ПВ-сети.

Важным достоинством этой технологии в планировании и оптимизации ресурсов является возможность адаптивного построения и исполнения планов, когда план не строится всякий раз заново при возникновении новых событий, как это делается в классических методах оптимизации, а только корректируется по мере появления событий в реальном времени.

Такая адаптация осуществляется непрерывно путем выявления конфликтов в расписаниях, проведения переговоров и достижения компромиссов между агентами потребностей и возможностями на виртуальном рынке, что позволяет системе работать в реальном времени. Постоянный поиск соответствий и пересмотр связей между сопряженными парными элементами — агентами потребностей и возможностями — позволяет строить расписание как "неустойчивое равновесие", легко изменяемое в реальном времени.

Агенты потребностей и возможностей могут как конкурировать на виртуальном рынке системы, так и кооперироваться (например, два исполнителя могут конкурировать за одну небольшую задачу или, наоборот, одна большая задача может требовать нескольких исполнителей).

Сложность модели ПВ-сети увеличивается как с ростом числа типов программных агентов, представляющих разнообразные интересы, предпочтения и ограничения различных участников, необходимых для решения задачи, так и с возрастанием числа возможных протоколов взаимодействий между агентами разных типов.

Метод сопряженных взаимодействий для поддержки ПВ-сетей реализуется следующим образом [12]:

- фиксируется множество сопряженных (в общем случае неоднородных) элементов системы (агентов), каждый из которых обладает опреде-

ленными возможностями и потребностями в других ресурсах;

- описываются индивидуальные цели и критерии принятия решения всеми агентами, а также их предпочтения и ограничения;
- определяются правила и протоколы (регламенты) сопряженных взаимодействий между агентами, позволяющие выявлять конфликты и находить компромиссы между элементами при установлении связей;
- с помощью специальных инструментальных средств программирования разрабатывается мультиагентная система моделирования сопряженных взаимодействий;
- с помощью этой системы строится первоначальная ПВ-сеть, определяющая соответствующее распределение ресурсов;
- если состояние ресурсов или потребности в них изменяются с приходом новых событий, то ПВ-сеть перестраивается в целях разрешения конфликтов, причем только в той части, которая непосредственно связана с изменениями;
- работа системы завершается, если агенты ПВ-сети не могут изменить свое состояние или закончилось время, отпущенное на решение задачи планирования.

Предлагаемый метод, описанный выше, во многом интегрирует наиболее современные идеи оптимального планирования, реализуемого в метаэвристиках, фактически создавая среду конкурирующих и кооперирующихся алгоритмов (агентов). Данный метод оказывается применим к динамическому планированию ресурсов любой природы [2—3].

Рассмотрим развитие метода сопряженных взаимодействий для динамического планирования нескольких произвольных задач на одного исполнителя, план которого выстраивается по мере поступления заказов в реальном времени.

Применительно к задаче планирования проектов НИР и ОКР можно выделить следующий перечень основных агентов:

- ◆ агент руководителя проекта — отвечает за предпочтения и ограничения проекта в целом, а также создает агентов отдельных задач, которые автономно планируются, но согласовывают свои решения с агентом проекта, и имеет следующие характеристики:
  - тип — агент потребности;
  - цель — быть выполненным с заданным качеством, в указанные сроки, в рамках бюджета и с минимальным риском;
  - предпочтения и ограничения: для выполнения проекта требуются ресурсы (исполнители) конкретной специализации и квалификации;
- ◆ агент задачи, соответствующий различным задачам частного план-графика;
- ◆ агент исполнителя, соответствующий различным типам ресурсов подразделения (исполнителей), со следующими характеристиками:
  - тип — агент возможности;

- цель — быть максимально загруженным, иметь максимальную оплату, получать задачи согласно своему индивидуальному плану развития и т. д.;
- предпочтения и ограничения: длительность работы (например, восьмичасовой рабочий день), возможность сверхурочных работ, календарь работы и т. д.;
- ◆ агент руководителя подразделения, старающегося равномерно загрузить своих подчиненных и перестраивать расписание в случае выявления "узких мест" на проекте.

Заметим, что если агент задачи является агентом потребности, то агент операции, входящей в состав задачи, который выполняет данную операцию в расписании исполнителя, является агентом ресурса (в данном случае слота времени).

Основные принципы предлагаемого метода адаптивного планирования проектов НИР и ОКР могут быть сформулированы следующим образом:

- каждый проект, задача и исполнитель получают своего программного агента, у которого ведется свое расписание;
- агент задачи получает требования и ограничения на планирование от агента проекта;
- агент задачи начинает планирование путем поиска необходимых ему ресурсов в сцене (сцена — объектная модель данных, отражающая план организации, которая описывает текущую ситуацию в подразделении, а именно, какой сотрудник какие работы и в какое время планирует исполнять);
- если подходящие ресурсы (исполнители) заняты, то фиксируется конфликт и начинаются переговоры по его разрешению путем перемещения задач на другое время или других исполнителей;
- в ходе переговоров возможны варианты: новая задача будет назначена на менее подходящий ресурс (исполнителя), предыдущая задача будет переназначена или сдвинется;
- решающим правилом для изменения плана по событию является условие, по которому сумма всех улучшений должна превосходить сумму всех ухудшений, вызванных новым событием;
- даже после решения своей задачи каждый агент не останавливается и продолжает пытаться улучшить свое положение.

Рассмотрим работу предлагаемого метода адаптивного планирования на примере.

### 3. Пример работы метода адаптивного планирования ресурсов

На рис. 1 (см. третью сторону обложки) показано исходное расписание: задачи № 1, № 2 и № 3 должны выполняться в рамках одного проекта (данные задачи обозначены одним цветом и соединены линией). Рассмотрим событие — появление задачи № 4, которая должна быть выполнена в указанный период ( $t_1, t_3$ ), при этом наиболее подходящим ресурсом является ресурс № 1.

Рассмотрим пример переговоров агентов для решения этой задачи. Схема переговоров агентов представлена на рис. 2. На диаграмме стрелки обозначают передачу сообщений агентам, фигуры — действия агентов.

В начальной ситуации создаются (пробуждаются) агенты задач № 4 и № 3, агенты ресурсов № 1 и № 2 и агент проекта. Агент задачи № 4 запрашивает из сцены список доступных ресурсов. В результате он определяет два доступных ресурса, удовлетворяющих его требованиям. Агент задачи № 4 запрашивает у каждого агента ресурса подтверждение возможности выполнения задачи.

Процесс опроса может происходить как последовательно и синхронно, так и параллельно и асинхронно, что особенно важно при наличии несколь-

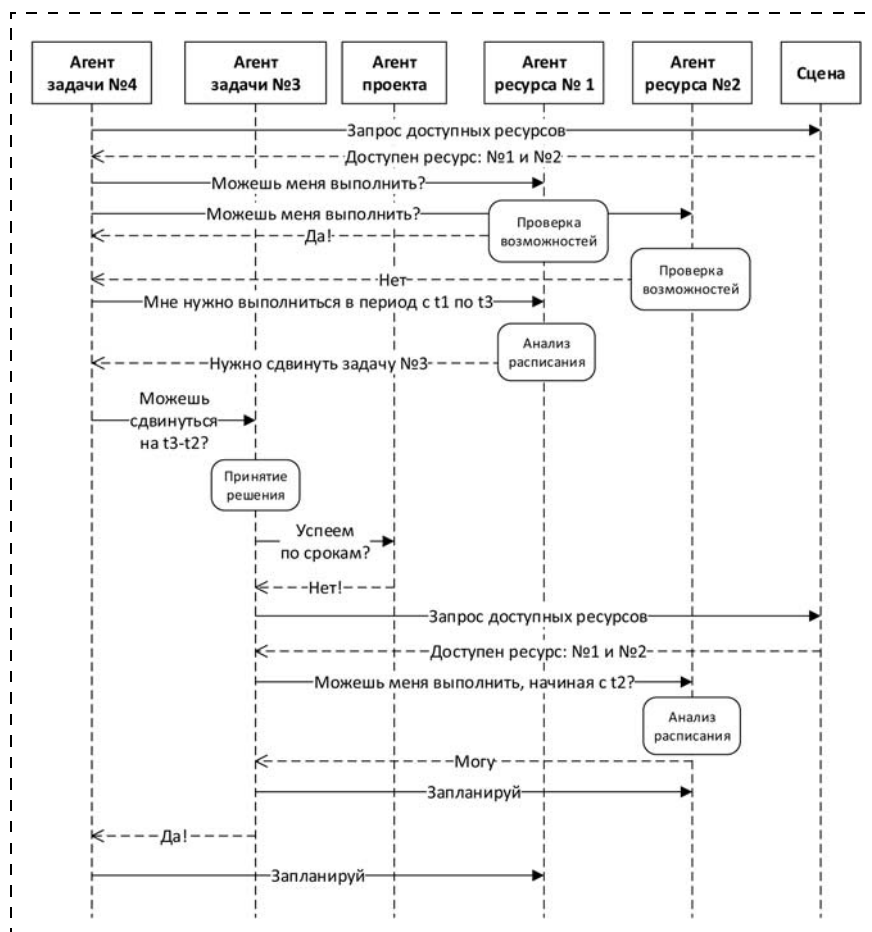


Рис. 2. Переговоры агентов

ких доступных процессоров и возможностей для параллельной обработки процессов планирования.

Получив запрос от агента задачи, агенты ресурсов проводят внутренний анализ возможности выполнить задачу № 4. Анализ возможности выполнения может включать в себя как проверку наличия необходимых навыков у исполнителя, так и более сложную логику, например, заинтересованность данного исполнителя в работе, наличие необходимого оборудования или материала и т. д. При этом на данном этапе не выполняется анализ расписания ресурса, что позволяет предотвратить лишние переговоры, если ресурс не удовлетворяет требованиям. Более того, агент задачи может отправить такое сообщение лишь для формирования начального списка ресурсов, с которыми будет вестись последующий диалог. В результате работы внутренней логики агент ресурса посылает ответное сообщение агенту задачи. Так, в нашем примере агент ресурса № 1 согласился выполнить задачу № 4, а агент ресурса № 2 — нет.

Когда агент задачи получает ответное сообщение от агента ресурса, он формирует список потенциальных ресурсов для планирования. На данном этапе агент задачи может обработать список ресурсов таким образом, чтобы исключить заведомо неоптимальные варианты, например, если текущей целью агента задачи является скорейшее завершение, а ресурс будет выполнять данную работу дольше остальных, то взаимодействие с ним будет происходить в последнюю очередь.

В рассматриваемой ситуации агент задачи № 4 решает взаимодействовать только с агентом ресурса № 1. Для следующего шага планирования агент задачи посылает агенту ресурса запрос на размещение задачи в план ресурса. Данный запрос может быть параметризованным, например, указанием интервалов дат начала и окончания работ.

Получив запрос на размещение в расписании, агент ресурса № 1 выполняет анализ расписания. Процесс анализа расписания заключается в поиске мест размещения, которые удовлетворяют интересам и задачи, и ресурса. В общем случае результатом анализа расписания является список возможных мест размещения с указанием конфликтов и дополнительных характеристик. Данный список отсылается в ответ агенту задачи.

Когда агент задачи получает ответ, он его анализирует и выбирает подходящие варианты. Если вариант размещения содержит информацию о возможном конфликте с другой задачей, агент начинает вести переговоры с ней. Возможным конфликтом будем считать ситуацию, при которой размещение задачи в данной точке плана приведет к нарушению баланса интересов, ранее достигнутого путем переговоров. Так как текущий план построен адаптивно путем переговоров, его изменение необходимо согласовать со всеми участниками, которые

могут быть вовлечены в ожидаемое перестроение плана. В нашем случае вариант размещения содержит информацию о возможном конфликте с задачей № 3. Для решения этой проблемы агент задачи № 4 вступает с ней в переговоры.

Агент задачи № 4 посылает агенту задачи № 3 сообщение с предложением сдвинуться вправо на интервал времени ( $t_3-t_2$ ), после чего агент задачи № 3 начинает процесс анализа. Агент задачи может обладать достаточно сложной логикой разрешения конфликта, в соответствии с которой агенту могут потребоваться переговоры с другими участниками. Так, агент задачи № 3 запрашивает у агента проекта, в состав которого входит эта задача, успеет ли проект завершиться в срок. В результате внутреннего анализа агент проекта дает отрицательный ответ. Это побуждает агента задачи № 3 искать другое решение. Таким решением является повторный поиск мест размещения в расписании. В результате диалога агент задачи № 3 находит место на ресурсе № 2, причем в то же время, что означает разрешение конфликта.

В общем случае логика разрешения конфликтов может быть более сложной и проходить в несколько раундов переговоров. Например, при использовании рыночного подхода, рассмотренного выше, агенты могут проводить виртуальный аукцион за право быть запланированными на ресурсе в нужное время.

Переговоры заканчиваются тем, что агенты задач № 3 и № 4 посылают утвердительное сообщение ресурсам о размещении задач в их плане.

В данном примере мы рассмотрели активную фазу планирования в ответ на появление новой задачи. Однако изменение плана может изменить общую ситуацию и тем самым возбудить новые события. Например, размещение задачи на другом ресурсе может привести к изменению суммарной загрузки ресурса, тогда агент подразделения должен решить эту проблему.

Итоговый план представлен на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Таким образом, план строится как динамическая сеть (равновесие) агентов задач, которые ведут переговоры о своем положении в расписании и планируют свою работу за счет сдвигов и "перескоков", допустимых отклонений моментов начала выполнения задач от предпочитаемого времени, а также взаимозависимостей между задачами, например, определенной последовательности выполнения задач. Агент задачи будет пытаться улучшить свои позиции про-активно или динамически изменять связи в случае непредвиденных событий.

При этом для разрешения конфликтов, которые могут возникнуть на этом участке, изменения могут затрагивать соседних исполнителей, вносить изменения в работу соседних отделов и т. д. Таким образом, график работ не будет перестроен полностью,

изменения будут максимально гибко встроены в список уже существующих работ. Такой подход позволяет экономить время на изменение плана, внося исправления в отдельные его части и не затрагивая график глобально.

Заметим, что такой подход удобен для последующей полуавтоматической (или полуручной) доработки плана при необходимости, когда не было возможности учесть какие-либо скрытые факторы. Любое действие пользователя может вызывать целую цепочку изменений, которая в последующем позволяет автоматически доработать расписание.

#### 4. Реализация метода адаптивного планирования ресурсов для решения задачи управления проектами НИР и ОКР

Разработанный метод нашел реализацию в интеллектуальной системе управления проектами НИР и ОКР для аэрокосмических приложений. Разработанная система планирования позволяет реагировать на события изменения задач, ресурсов, проектов в реальном времени [14].

Для оценки эффективности работы разработанного метода адаптивного планирования было проведено исследование зависимости времени обработки событий от числа событий.

Для проведения исследования были сделаны следующие допущения:

- все ресурсы могут выполнять любые задачи;
- все ресурсы полностью доступны;
- все задачи имеют одинаковую длительность;
- все задачи имеют одинаковый приоритет;
- все проекты состоят из одинакового числа задач;
- сроки проектов не установлены (случайны).

Под событием поступления проекта будем понимать появление необходимости планирования ресурсов для данного проекта, состоящего из набора последовательно связанных между собой задач. Связь означает, что для выполнения последующей задачи необходимо завершение выполнения предыдущей задачи проекта.

Модельный эксперимент был проведен при следующих условиях:

- моделировали поступление события планирования нового проекта из 10 подзадач;
- рассматривали время обработки события при различном количестве ресурсов;
- эксперимент проводили на общем поле из 500 задач.

Полученный график представлен на рис. 4 (см. третью сторону обложки).

Эксперимент показал, что с увеличением плотности плана время обработки возрастает до определенного предела, после которого все последующие события обрабатываются быстрее из-за сокращения числа возможных опций согласования решений.

Дальнейшее развитие метода предполагает введение механизмов внутренней саморегуляции агентов при построении расписаний.

#### Выводы

В статье рассмотрены существующие методы планирования и предложен метод адаптивного планирования для управления проектами НИР и ОКР в аэрокосмических приложениях. Разработанный метод позволяет строить и корректировать план динамически, реагируя на события, возникающие во внешней среде, и учитывая особенности каждой задачи и исполнителя, что оказывается особенно важным для применения современных методов командного управления.

Перспективы развития метода связаны с введением механизмов саморегуляции, позволяющей менять стратегии агентов по принятию решений в зависимости от загруженности расписания ресурсов.

#### Список литературы

1. **Виттих В. А.** Введение в теорию интерсубъективного управления. Самара: СНЦ РАН, 2013. 64 с.
2. **Скобелев П. О.** Мультиагентные технологии в промышленных приложениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 33–46.
3. **Скобелев П. О.** Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Информационные технологии. Приложение. 2013. № 1. 32 с.
4. **Meisels, Amnon.** Distributed Search by Constrained Agents. Springer, 2008.
5. **Yokoo M.** Distributed Constraint Satisfaction: Foundation of Cooperation in Multi-agent Systems. Springer, 2001.
6. **Adrian Petcu.** A class of Algorithms For Distributed Constraint Optimization. IOS Press, 2009.
7. **Tasgetiren M. F., Sevkli M., Liang Y. C., Yenisey M. M.** Particle swarm optimization and differential evolution algorithms for job shop scheduling problem // International Journal of Operational Research. 2006. V. 3. N 2. P. 120–135.
8. **Mekni S., B. Fayech Châar, Ksouri M.** TRIBES Optimization Algorithm Applied to the Flexible Job Shop Scheduling Problem // 10<sup>th</sup> IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, July 1–2, 2010. Lisbon, Portugal. P. 365–370.
9. **Pinedo M. L.** Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Springer. 2008.
10. **Multiprocessor Scheduling, Theory and Applications** / Edited by Eugene Levner. I-TECH Education and Publishing, 2007.
11. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и Телемеханика. 2003. № 1. С. 162–169.
12. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автоматика. 2009. № 2. С. 78–87.
13. **Скобелев П. О.** Онтология деятельности для ситуационного управления предприятиями в реальном времени // Онтология проектирования. 2012. № 1 (3). С. 6–38.
14. **Феоктистов А. Л., Клейменова Е. М., Скобелев П. О., Сюсин И. А., Ларюхин В. А., Царев А. В., Симонова Е. В.** Разработка принципов построения многоуровневой мультиагентной системы для управления проектами НИР и ОКР РКК "Энергия" // Тр. XIV Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах", 19–22 июня 2012, Самара, Россия. Самара: СНЦ РАН. 2012. С. 718–723.