



Мультиагентные модели и методы самоорганизации расписаний для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени



Д.т.н. Скобелев П.О. – Зав. каф. ЭСИБ САМГТУ,
Зав. лабораторией «Мультиагентные системы» ИПУСС РАН



1. Современная постановка задачи управления ресурсами предприятий



Новые вызовы глобальной экономики

- Растет **сложность** принятия решений по управлению предприятиями
 - *Неопределенность*: трудно предсказать изменения спроса и предложения
 - *Событийность*: часто случаются события, которые меняют планы
 - *Ситуативность*: решение надо принимать по ситуации
 - *Многофакторность*: много разных критериев, предпочтений и ограничений
 - *Высокая связность*: принятие одного решения вызывает изменение других
 - *Индивидуальность*: потребители требуют все более индивидуального подхода
 - *Конфликты*: все больше участников с противоречивыми интересами
 - *Трудоемкость*: слишком много опций, чтобы просчитать последствия
- Усиливается **динамика** принятия решений в ходе управления
 - Требуется *высокая оперативность* для принятия решений
 - Идут постоянные *изменения спроса и предложения*
 - *Сокращается время на ответ* - решения принимаются под прессом времени
 - Необходимо постоянно *балансировать* между разными критериями
 - Надо непрерывно считать *экономику вариантов* и *менять цены* динамически
 - Нужны постоянные *взаимодействия* с клиентами и поставщиками ...

Эти особенности требуют методов и средств для поддержки принятия решений по управлению ресурсами в реальном времени



Современные задачи управления ресурсами-1/2



Управление грузоперевозками: 500 грузовиков на дороге, 100 заказов в день, горизонт: 1-5 дней, 600 точек развозки, время на заказ - 3-15 сек, критерии – прибыль, качество, стоимость и время перевозки и риски, равномерность пробега машин, режимы работы водителей, штрафы за опоздание, типы грузов и тары, время работы складов, времена стыковок и др.;



Управление фабриками: сборка двигателя – 50 тыс. деталей, 30-40 цехов, каждый цех – 150 рабочих, каждое изделие – от 10 до 300 техопераций, 10 заказов на цех в день, одно ССЗ рабочего – до 100 задач, горизонт – от дня до 6 месяцев, число задач на горизонте - до 150 тыс., время на событие – от 2 сек до 5 мин, учет техпроцессов, умений рабочих, брака, наличие на складе и т.д.;



Управление цепочками поставок: до 10 тыс. товаров, 2 тыс. узлов в сети (фабрики, магазины, склады), 1 тыс. каналов доставки, 2 тыс. заказов в день, горизонт – от 1 мес. до 1 года; обработка 1 события - от 20 сек. до 15 мин., учет прогнозов продажи, емкость каналов, скорость продажи, цены заказов, штрафы за отклонение, стоимости производства, транспорта, хранения, структура сети, минимальный объем партии и др.



Управление мобильными бригадами: число событий в день: от 50 до 250 заявок в период проброса, в среднем около 100 заявок в день; число ресурсов: 43 бригады; горизонт планирования: период работы смены (8-12 часов); время на события – до 1 минуты, критерии: минимальный пробег, как можно больше заявок выполнить и др.



Современные задачи управления ресурсами-2/2



Управление грузопотоком МКС: 3500 типов грузов, 4 корабля “Союз” и 4 “Прогресс” в год, 2-5 европейских и американских, загрузка одного “Прогресса” – тысячи наименований грузов, надо учитывать состав экспедиций, типы грузов и их взаимозаменяемость, нормы потребления грузов на МКС и т.д. Долгосрочная программа рассчитывается на 3 года, программа полета и грузопоток - на год, номинальный план полета - на 2 экспедиции (6 месяцев).



Управление РЖД: на полигоне Московский: 49 станций, 48 перегонов (2-4-х путные), блок -участков – 3500, около 800 поездов в день, горизонт – сутки, начальное планирование ~4 минуты. В день может происходить до 50 различных событий: окна ремонтов, поломки путей и т.д. Обработка события - до 3 минут. План поезда - 40-50 крупных операций. Ограничения – соблюдение времен хода и продолжительности стоянок, интервалов движения, приоритетов поездов, времен разгона и торможения, опасности грузов и др.



Управление проектами: средняя организация (100 чел) - 40 проектов в год, каждый по 300 – 500 задач. В день поступает 2-5 новых задач на каждого исполнителя и случается от 5 – до 20 событий. Горизонт - 3 месяца, сеть расписания – примерно 10 тыс. связных задач, обработка 1 события от 2 сек. до 5 минут. Учитывается приоритет, для каждого исполнителя свой календарь, может давать свои предпочтения, учет связей между задачами, учет компетенций исполнителей и др.



Реакция на вызовы: что нужно, чтобы быть эффективным?

Что случается с предприятиями, когда растет сложность, динамика и неопределенность, обусловленные быстрыми и частыми изменениями спроса и предложения, и что нужно для повышения эффективности?

Традиционные предприятия	Требования эффективности
Централизованные, высоко иерархические, монолитные, детерминированные медлительные организации, унаследованные с 70-х годов	Открытые, децентрализованные, сетевые, быстрые - полностью в он-лайн, не зарегистрированные организации
Типовая реакция на непредвиденные события: <ul style="list-style-type: none"> - Увеличить число ресурсов - Рост объемов складов - Задержка в реакции на события 	Оперативное, гибкое и точное принятие решений по событиям, позволяющее адаптировать планы предприятий «на лету»
Падение эффективности в использовании ресурсов	Предсказание пиков и узких мест для сокращения простоев и дефицита ресурса
Рост цен вследствие неэффективности предприятий переводится на заказчиков	Динамическое образование цен по ситуации (экономика реального времени)
Резкое падение конкурентоспособности предприятий на международном и даже внутреннем рынке	Повышение конкурентности за счет кооперации и специализации, выявление и продажа лишних активов



Задача многокритериального управления ресурсами по ситуации в реальном времени

Анализ проблем управления предприятиями показывает, что управление ресурсами - сложная многокритериальная задача, требующая согласованного решения «по ситуации» во взаимодействии с множеством участников этого процесса, имеющим свои различные интересы, критерии принятия решений, предпочтения и ограничения (заказчик, исполнитель, поставщик и т.д.).

Примеры множества критериев планирования для принятия решений:

Обеспечить
качество
выполнения работ

Выполнить все
заказы в срок

Минимизировать
стоимость
исполнения заказов

Равномерная
загрузка ресурсов

Минимизировать
риски

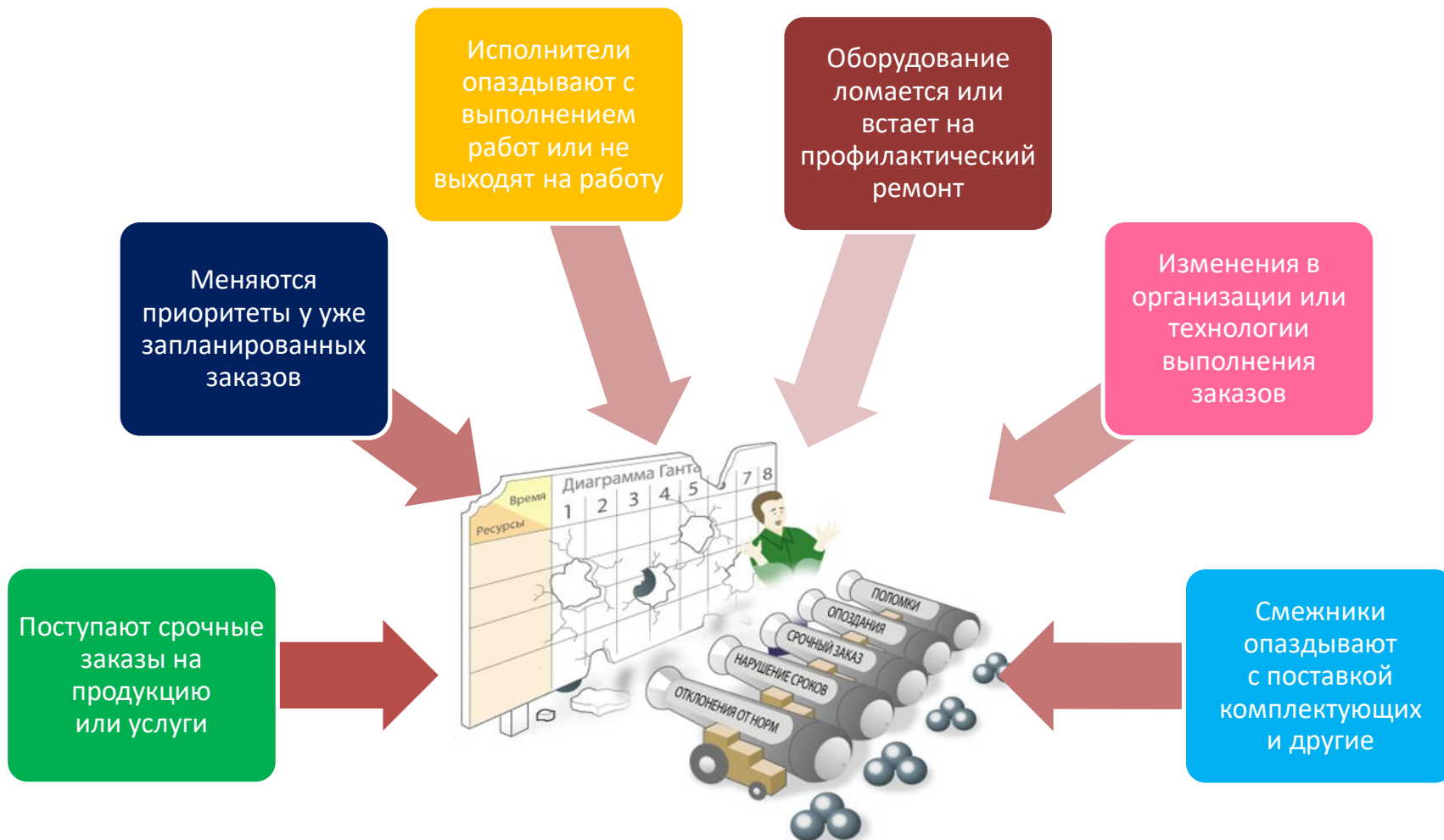
Выдать рабочим
зарплату в конце
месяца

Обеспечить
профилактику
и ремонт
оборудования

Кроме того, задача управления ресурсами должна решаться адаптивно в ходе непрерывных изменений начальных условий по событиям в реальном времени. А в перспективе, в ходе решения задачи и важность, и состав критериев могут меняться в зависимости от изменения обстановки или результатов каждого участника.



Адаптивность – ключевое требование для управления ресурсами в условиях неопределенности





А что предлагается на рынке ERP систем?

Название продукта	Разработчик	Основные сферы применения
SAP ERP	SAP	Все основные
BAAN	BAAN- Infor	Маш, нефть, химия, пищевая, металлургия
Oracle Applications	Oracle	Маш, нефть, химия, металл, торговля
OneWorld J.D.Edwards	Robertson & Blums Corp.	Маш, нефть, пищевая, химия, торговля
iRenaissance	Interface, Ltd	Нефть, химия, пищевая
Microsoft Dynamics AX	Microsoft	Производство, финансы, цепочки поставок (крупный и средний бизнес)
Microsoft Dynamics NAV (Navision)	Microsoft	Средний и мелкий бизнес, финансы, торговля
Syteline	Frontstep CIS	Маш, пищевая, химия, металлургия и торговля
Platinum ERA	Эпик-Рус	Все основные
CA-PRMS	R-Style	Машиностроение
IFS Applications	Форс-холдинг	Все основные
MFG/PRO QAD	QAD	Маш, пищевая, торговля
Scala	Scala CIS	Все основные
Infor ERP LN	Infor	Средние и крупные предприятия (от финансов и производства до обслуживания)

Как правило, все указанные пакеты программ предлагают модели и методы решения задач планирования и оптимизации на основе методов линейного программирования



Традиционные методы «централизованной» оптимизации

- Традиционное централизованное планирование основано на математических методах: линейном и динамическом программировании, дискретной оптимизации, программировании в ограничениях и др.;
- Эвристические методы:
 - жадные алгоритмы;
 - генетические алгоритмы;
 - нейросети и нечеткая логика;
 - применение эвристических правил (Earliest Deadline First и пр.);
 - метаэвристики локального поиска;
 - Tabu Search – метод, использующий историю методов локальной оптимизации, когда некоторые уже исследованные плохие варианты запрещается;
- Имитационные методы (“отжига” и др.);
- Стохастические методы (Монте-Карло и др.);
- Мета-эвристики: комбинации параллельных эвристических алгоритмов.



Методы «распределенной» оптимизации

- **Поставленная задача близка классу Distributed Constraint Optimization Problem (DCOP);**
- **Имеется ряд методов решения такого класса задач:**
 - методы, учитывающие сетевую структуру задачи – Asynchronous Distributed Constraint Optimization (ADOPT),
 - Optimal Asynchronous Partial Overlay (OptAPO),
 - Distributed pseudo-tree optimization (DPOP),
 - Asynchronous Backtracking (ABT);
 - методы роевой оптимизации, основанные на применении метафоры «роя» частиц (Particle Swarm Optimization) и другие.
- Вместе с тем, это попытка «центральным блоком» разделить задачу на составные части и далее объединить частные решения.
- **Важный шаг в ТАС:** имеется управляющий орган, который должен выбрать такое управление, которое бы максимизировало значение его эффективности при условии, что учитывается свобода выбора управляемых субъектов, а также модели стимулирования и т.д.
- Но еще нужны **самоорганизация и переговоры** между участниками.



Особенности постановки задач, затрудняющие применение известных методов

- высокая сложность и размерность задач, которые так просто нельзя свести к простым подзадачам и решить по отдельности;
- наличие множества критериев, которые могут задаваться по условиям, дискретно, процедурно, алгоритмически, таблично, в зависимости от момента времени и т.д.;
- планирование ведется не в пакетном, а в «скользящем» режиме и сочетается с одновременным исполнением и контролем планов;
- наличие непредвиденных событий (приход новых заявок, отзыв уже запланированных, поломка ресурсов и т.д.);
- приход нового события не должен вызывать пересчет всего расписания;
- В процессе «умной оптимизации» необходимо управлять процессом переговоров для контроля времени вычислений на ответ;
- критерии принятия решений или их важность зависят от самого момента времени и получаемых результатов;
- характеристики заказов и ресурсов могут меняться во времени;
- необходимо уметь объяснить решение пользователю и др.



2. Сдвиг парадигмы в управлении ресурсами: переход от оптимизации одной целевой функции к поиску баланса интересов (консенсуса) между целевыми функциями многих участников в ситуации, развивающейся в реальном времени



Развитие подходов к решению задачи

1940-1980

Классические оптимизаторы: найти глобальный оптимум!

- ◆ **Принятие решений в условиях консонанса**
- ◆ Все заказы и ресурсы одинаковы, известны заранее и имеют одни потребности и возможности
- ◆ Имеется центральный орган, который за всех принимает решения
- ◆ Ситуация не меняется по ходу процесса решения, включая состав или важность критериев

Эмпирические решатели - там, где быстро растет размерность пространства

1980-2010

Теория игр: найти лучшую стратегию выигрыша!

- ◆ **Принятие решений в условия конфронтации**
- ◆ Все участники (или группы) имеют собственные конфликтные интересы
- ◆ Каждый играет за себя и максимизирует свою целевую функцию
- ◆ Тот кто выиграл – выиграл за счет другого, который проиграл
- ◆ Ситуация не меняется по ходу пьесы

Кооперативные игры – чтобы как-то учесть интересы групп участников

2010 – н/в

Теория согласованного принятия решений: найти консенсус в ситуации!

- ◆ **Принятие решений в условия компромисса**
- ◆ Все заказы и ресурсы имеют свои интересы, но учитывают интерес их общего целого
- ◆ Готовы идти на уступки ради чужих интересов или интереса центра (при условии компенсации)
- ◆ Центр может влиять на тех, кто не может сам договориться путем точечных денежных интервенций и др.
- ◆ Ситуация меняется по ходу

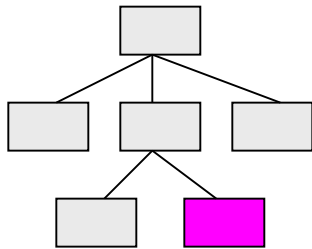
Будет развиваться для сетевых применений, где все равны и надо договариваться



Мультиагентный подход для решения сложных задач управления ресурсами в реальном времени

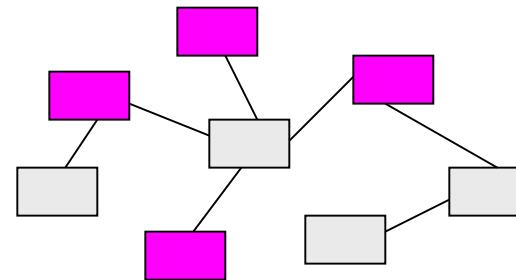
Классические системы

- Иерархии больших программ
- Последовательное выполнение операций
- Инструкции сверху вниз
- Централизованные решения
- Управляются данными
- Предсказуемость
- Стабильность
- Стремление уменьшать сложность
- Тотальный контроль



Мультиагентные системы

- Большие сети малых агентов
- Параллельное выполнение операций
- Переговоры
- Распределённые решения
- Управляются знаниями
- Самоорганизация
- Эволюция
- Стремление наращивать сложность
- Создание условий для развития



■ Одновременно активные программы (сопрограммы)

В ноябре 2018 года автономные вещи и мультиагентные технологии вошли в список трендов на 2019 год под номером №1 по версии Gartner

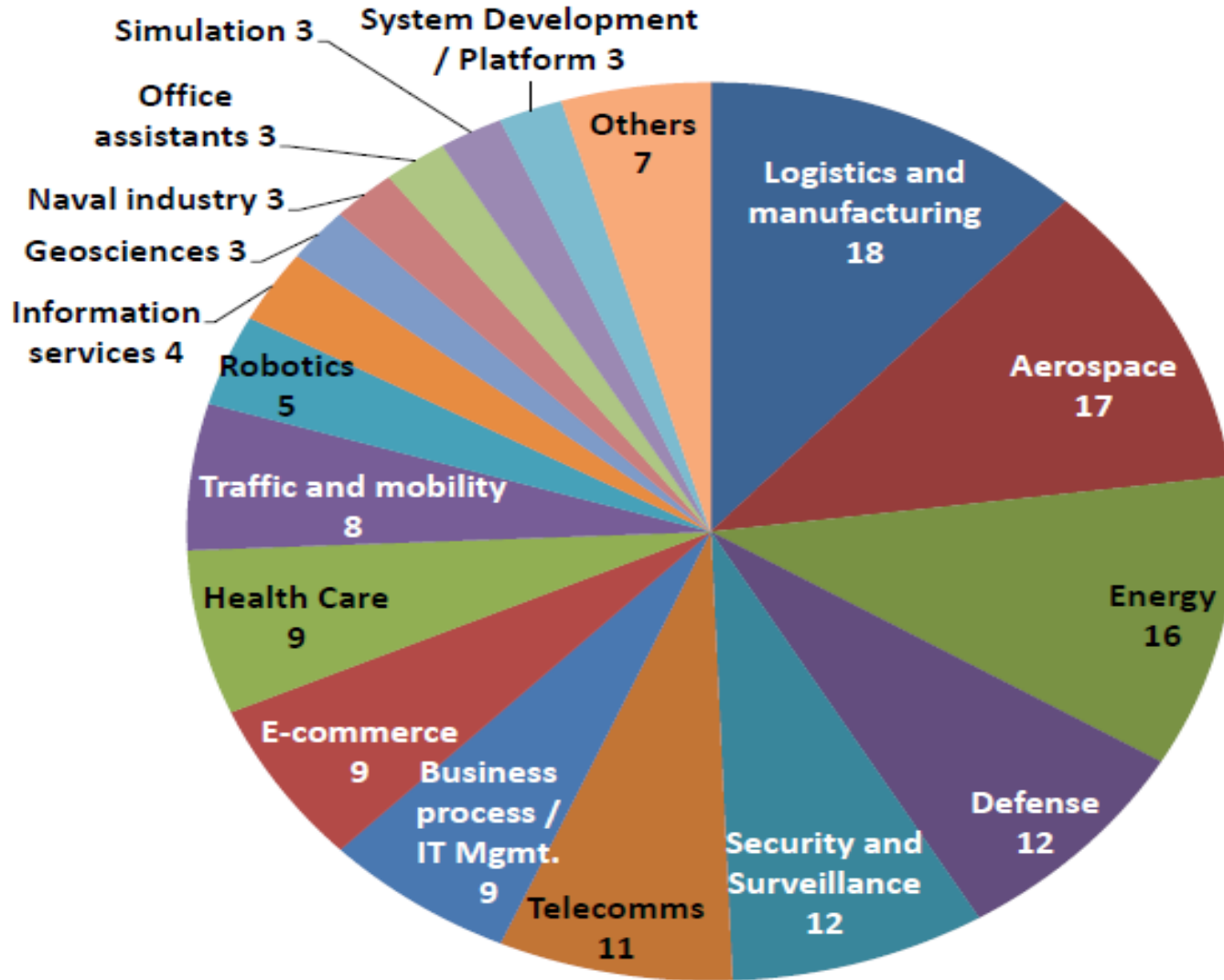


Агент – ключевой элемент системы





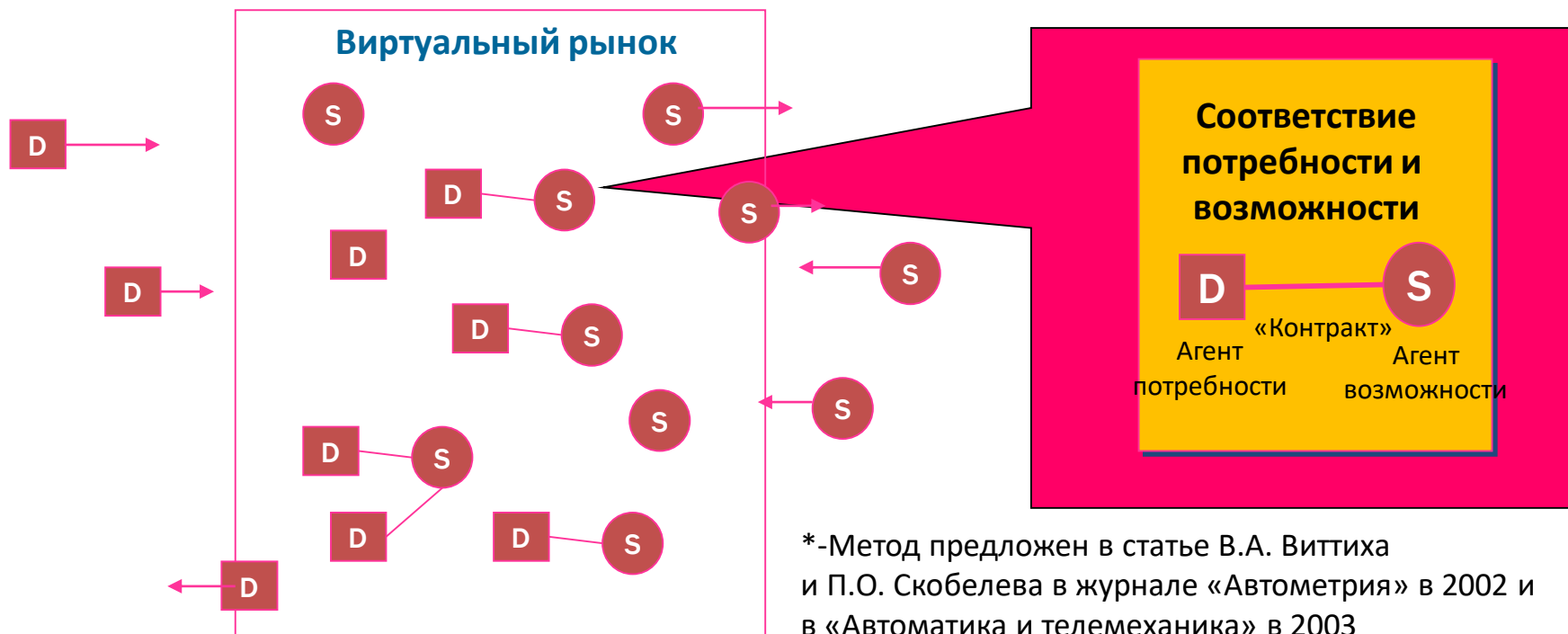
Применение МАС по областям промышленности (обзор 252 систем по работе J.Muller 2014)





Сети потребностей и возможностей (ПВ-сети)

Постоянный поиск соответствий между конкурирующими и кооперирующими агентами потребностей и возможностей **на виртуальном рынке** системы позволяет строить решение любой сложной задачи как динамическую сеть связей, гибко изменяемую в реальном времени (*).



Примечание: Математическое обоснование эффективности виртуального рынка как альтернативы линейному программированию см. в трудах известных математиков из Кембриджа, вышедших в 2009-2010 гг.:

- 1) Y.Shoham, K.Leyton-Brown. Multi-agent systems: Alghoritmich, Game Theoretic and Logical Foundations. – Cambridge University Press, 2009: <http://www.masfoundations.org>.
- 2) Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World. By David Easley and Jon Kleinberg. Cambridge University Press, 2010 : <http://www.cs.cornell.edu/home/kleinber/networks-book/>.

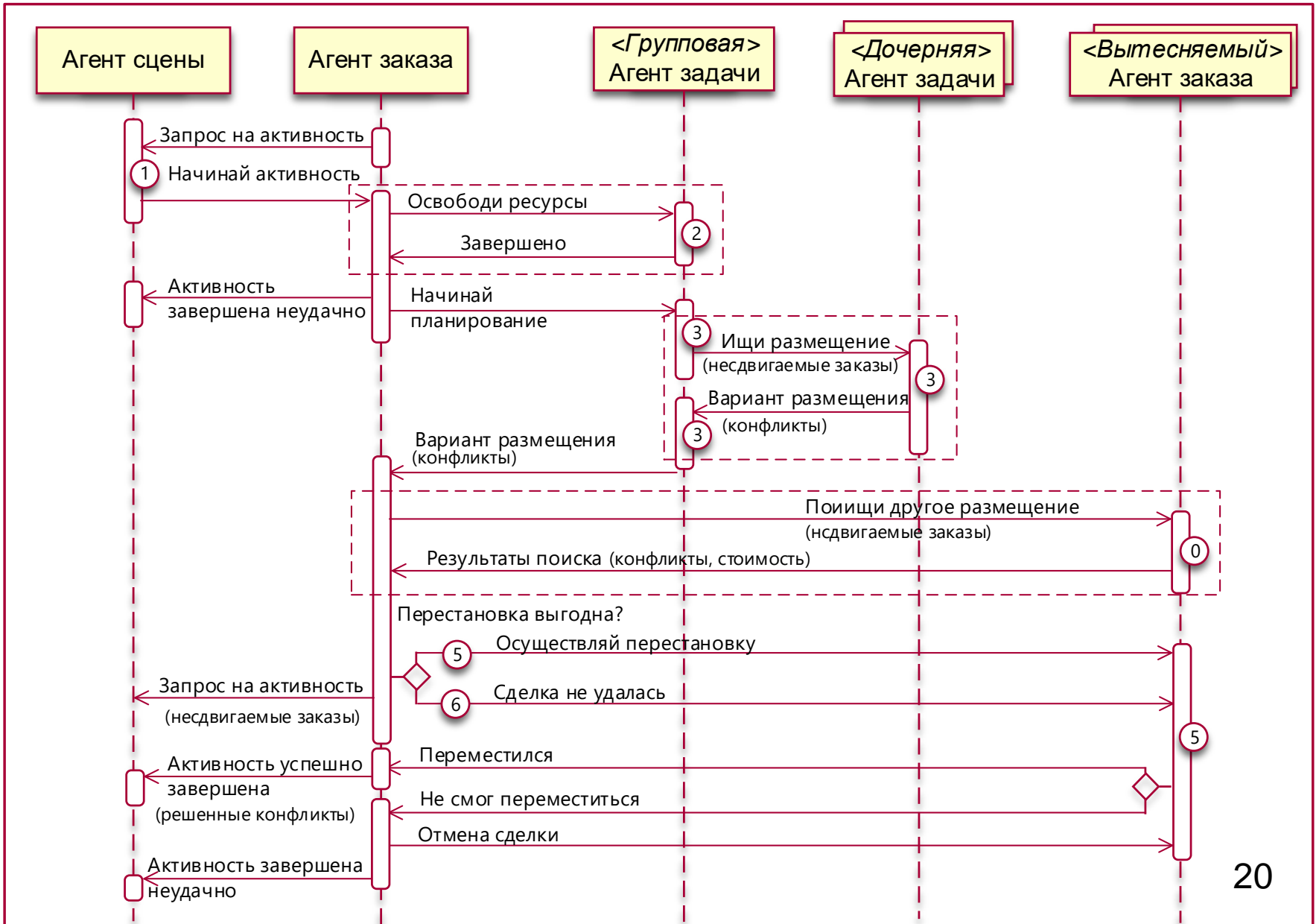


Методы виртуального рынка

- **Основаны** на различных вариантах аукционо-подобных Contract-net протоколах Сандхольма.
- **Суть подхода:** Для каждого Агента i существует цена C_i , такая, что для всех наборов задач T , функция $C_i(T)$ является стоимостью для Агента i для выполнения задач набора T .
 - Каждый агент выбирает некоторый начальный набор задач, но в целом этот выбор не является оптимальным, в смысле минимальности суммы затрат всех агентов.
 - Затем агенты вступают в переговорный процесс, который улучшает назначение и завершается оптимальным решением, то есть с минимальными затратами.
 - Агенты участвуют в раундах переговоров, заключают и разрывают контракты, обмениваясь задачами, делая взаимовыгодные уступки с их оплатой.
- **Доказано**, что задача LP (разрешимая за полиномиальное время) допускает такую аукционную процедуру с твердыми гарантиями по полиномиальности (пример: проблема взвешенного соответствия на двудольном графике, известная как «задача о назначениях»).
- **В целом**, задача планирования и оптимизации (целочисленного программирования) NP-полная, и поэтому аукционо-подобная процедура пока еще не гарантирует полиномиального времени. Но оказывается, что и в этом случае можно успешно применить обобщения такой аукционной процедуры (но без гарантий).
- **Отмечаются** важные свойства таких алгоритмов: интуитивная ясность, доказуемость, параллелизм, пригодность для распределенных систем, устойчивость к возмущениям и нарушениям в постановке задач и т.п.



Фрагмент протокола взаимодействия агентов





Поиск консенсуса в ПВ-сети для людей и вещей (заказы и ресурсы, продукты, станки, детали и т.д.)

Пример: расписание цеха завода как «консенсус» агентов людей и вещей:

Я должна любой ценой
выпустить все заказы в срок
и обеспечить загрузку и оплату
моим рабочим

Диспетчер



Можно ли ускорить сборку, чтобы
мне попасть на отгрузку в порт
заказавшему меня клиенту?

Продукт



Смогу ли я заработать
к отпуску через
сверхурочные в этом
месяце?

Рабочий

Но мне нужен
срочный ремонт!

Станок



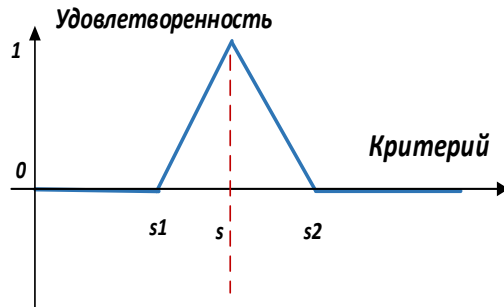
Партия бракованная,
требуется срочная замена!

Материалы

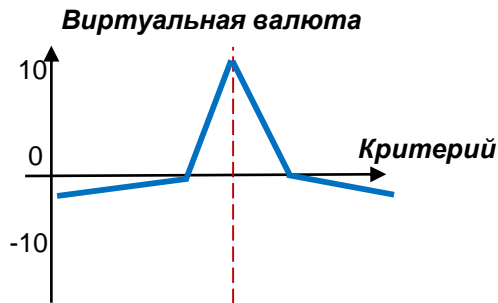


Принятие решений агентами виртуального рынка при разборе конфликтов в методе компенсаций

Сколько стоит потеря моей удовлетворенности?



Зависимость компоненты целевой функции агента от значения КРІ



Функция бонус-штрафов

Зависимость компоненты бюджета агента от значения КРІ

Удовлетворенность агента

- В основе работы системы лежит «виртуальный рынок», на котором агенты заказов могут покупать услуги ресурсов
- При этом состояние агента характеризуется степенью удовлетворенности (свертка по критериям) и наличием финансовых ресурсов для улучшения удовлетворенности
- Чем ближе состояние к требуемому идеалу, тем выше показатель удовлетворенности агента и тем больше система премирует агента.
- Виртуальные деньги при этом играют роль «энергии» для установки и перестройки связей.

Бонусы и штрафы агента

- При входе в систему агент получает сумму по тарифу на счет для приобретения услуг ресурсов.
- Бюджет расходуется агентом на поиск решения и дальнейшую перестройку расписания для улучшения уровня удовлетворенности.

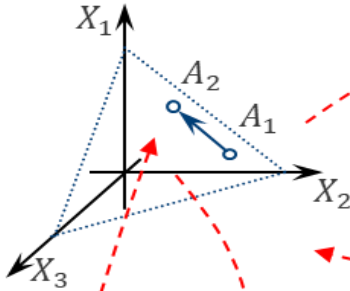
Решение конфликтов

- В случае конфликта один агент может предложить другому компенсацию за уступку своего места в плане.
- Второй агент уйдет из конфликта и освободит свое место если только сумма ухудшений будет меньше чем сумма улучшений для системы в целом.



Пример переговоров агентами виртуального рынка при разборе конфликтов и поисках консенсуса

Пространство вариантов Агента А



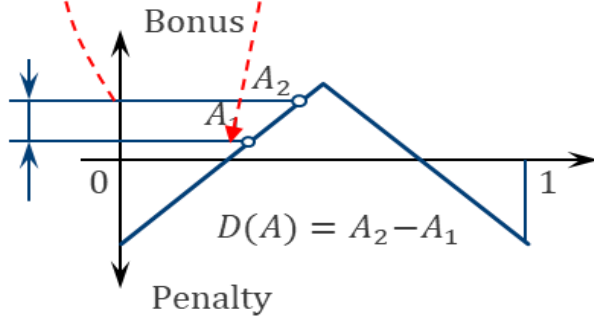
Удовлетворенность Агента А

$$S^A = \sum_{i=1-3} k_i F(x_i - x_{id}^A),$$

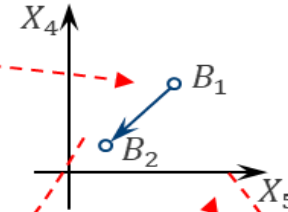
где k_i вес x_i ,
 S^A нормировано $[0 - 1]$,
 $S^A \rightarrow \max$



Функция бонус-штраф Агента А



Пространство вариантов Агента В



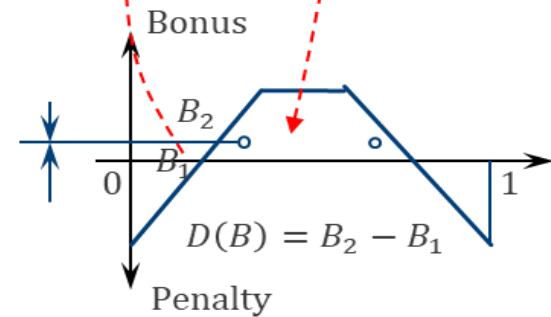
Удовлетворенность Агента В

$$S^B = \sum_{i=4-5} k_i F(x_i - x_{id}^B),$$

где k_i вес x_i ,
 S^B нормировано $[0 - 1]$,
 $S^B \rightarrow \max$



Функция бонус-штраф Агента В





Демо МАС «Рой спутников»



Эволюция моделей и методов VM: «Социалистическая» и «Капиталистическая» модели

№ пп	Наименование	Краткое описание	Комментарий
1.	<p>«Социалистическая модель»: агенты принимают решения в случае, если повышается значение функции удовлетворенности системы в целом</p>	<p>Агенты не имеют собственных функций удовлетворенности, но ищут варианты, ориентируясь на повышение функции удовлетворенности системы в целом, деньги не используются</p>	<p>Наиболее простая модель, удобная для понимания принципов</p>
2.	<p>«Капиталистическая модель»: агенты мира работают только не только по приросту собственной функции удовлетворенности, и при этом используют деньги</p>	<p>При принятии решений агенты используют не только оценку прироста собственной целевой функции, но и деньги - как для оценки физических затрат на выполнение заказов (расчет стоимости расписания), так и оценки затрат на сам процесс построения вариантов расписаний (стоимость вычисления расписания), в этих целях предложена экономика 1-го и 2-го рода</p>	<p>Более сложная модель, имеющая больше возможностей для управления вычислениями в ходе поиска решений</p>

Направления развития: управление самими вычислениями в ходе построения расписаний – возможность оценки достижимого прироста ценности против затрат времени на получение результата.



Эволюция моделей и методов VM: Centralized vs Distributed

№ пп	Наименование	Краткое описание	Комментарий
1.	<p>Централизованная модель принятия решения в мире агентов с «главным арбитром», преследующим интерес системы в виде общей целевой функции</p>	<p>Агенты вырабатывают собственные варианты реакции на событие и разрешения конфликтов, но которые рассматриваются, оцениваются и принимаются агентом системы на основе оценки прироста общей целевой функции</p>	<p>Агент системы принимает итоговое решение, которое готовят агенты нижнего уровня.</p>
2.	<p>Распределенная модель принятия решения в мире агентов без «главного арбитра» - с собственными целями, предпочтениями и ограничениями каждого агента</p>	<p>Агенты работают на свои собственные цели, и нет «главного арбитра» - агента системы. Решение конфликтов происходит на основе согласования приростов целевых функций каждого из участника при разборе конфликтов, в идеале, с учетом виртуальных денег, которыми может располагать каждый агент.</p>	<p>Агент системы в целом также имеет право на жизнь и в этой модели может быть одним из многих агентов, действующим при разборе конфликтов на общих основаниях.</p>
3.	<p>Комбинированная (гибридная) модель для направляемой самоорганизации (Guided Self-Organization)</p>	<p>Подключение «супервайзера» в случае, когда агенты сами не могут разрешить конфликты и требуется вмешательство «высшей силы» с дополнительными ресурсами для расшивки неразрешимых «узких мест» (например, дает дополнительные деньги для перестройки участка расписания)</p>	<p>Агент системы может компенсировать уступки агентам из денег, которые придут от разрешения неразрешимого на их уровне конфликта</p>



Эволюция моделей и методов VM: Экономика 1-го и 2-го рода

№ пп	Наименование	Краткое описание	Комментарий
1.	Экономика 1-го рода: учет физических расходов при реализации планов по выполнению заказов	При расчете вариантов планов агенты используют сведения о физических расходах (стоимость топлива для перевозки груза грузовиком, оплата зарплаты и сверхурочных водителя, амортизация и т.д.)	Не учитывается стоимость работы самого офиса агентов, т.е. стоимость самого процесса планирования.
2.	Экономика 2-го рода: учет офисных (накладных) расходов при реализации планов по выполнению заказов	При расчете вариантов планов агенты используют сведения о накладных расходах (стоимость работы самих агентов в офисе, затраты по прокладке маршрутов, затраты по выявлению и разрешению конфликтов и коммуникации агентов между собой и с пользователем и т.д.)	Стоимость перемещения с ресурса того заказа, который много раз уже двигался, будет много больше стоить

Направления развития: разделение расходов по типу **Shared Costs**: если два заказа запланированы на одном ресурсе, то эти заказы делят расходы (оплачивают ресурс) пропорционально, что открывает возможности для **Dynamic Pricing** – переход на динамические цены по ситуации вместо жестких тарифов.



Эволюция моделей и методов VM: Synchrony vs Asynchrony Agents (Deterministic vs Non-Deterministic)

№ пп	Наименование	Краткое описание	Комментарий
1.	Synchrony Agents: синхронная последовательная работа агентов под управлением собственного диспетчера с контролем процесса передачи управления	Обработка следующего события начинается только после того, как заканчивается обработка предыдущего, всегда обрабатывается только одно событие.	Полный детерминизм.
2.	Asynchrony Agents: асинхронная параллельная работа агентов под управлением соответствующей среды (АККА и др.)	Обработка следующего события не ждет завершения обработки предыдущего события, одновременно в системе может обрабатываться произвольное множество событий, в том числе, влияющие друг на друга.	Полный недетерминизм.

Направление развития: создание полностью недетерминированной системы планирования и оптимизации ресурсов.



Эволюция моделей и методов VM: Прямые взаимодействия Vs Косвенные

№ пп	Наименование	Краткое описание	Комментарий
1.	Собственная память агентов и прямые коммуникации: агенты хранят фрагменты решения в распределенном виде, каждый - своей памяти, нет общей памяти	Агенты взаимодействуют друг с другом как по горизонтали, так и по вертикали, при отсутствии общей памяти (сцены) для хранения формирующегося решения задачи (расписания)	Высокие расходы на коммуникацию и синхронизацию планов
2.	Общая память (сцена) и непрямые коммуникации: агенты хранят результаты работы в общей памяти (сцене), через которую взаимодействуют с непрямой коммуникацией	Агенты не взаимодействуют напрямую между собой, но поднимаются на события, происходящие в сцене, принимают решения и записывают туда свои результаты	Общая память как «узкое горло» для взаимодействия агентов
3.	Комбинированная схема: есть и общая память (сцена) и собственная память у каждого агента	Агенты взаимодействуют как напрямую, так и через общую память (сцену).	Наиболее сложная рациональная схема

Направление развития: распределенная многоуровневая сцена взаимосвязанных агентов для непрямой коммуникации в сочетании с прямой коммуникацией.



Эволюция моделей и методов VM: Одноуровневые МАС против многоуровневых (Рой роев)

№ пп	Наименование	Краткое описание	Комментарий
1.	Одноуровневые (плоские) системы: агенты работают на одном уровне (в одном «рое»)	Агенты на виртуальном рынке равны в том смысле, что нет вложенных структур, что затрудняет естественное масштабирование (например, участок-цех-завод или соседние регионы)	Трудности масштабирования
2.	Многоуровневые системы: агенты устроены по типу «матрешек» с вложенными мирами («рой роев» агентов)	Вложенные миры агентов выступают как «матрешки-коконы», между которыми строится горизонтальные и вертикальные взаимодействия также, как раньше между отдельными агентами (например, участок-цех-завод или соседние регионы)	Возможности для масштабирования

Направление развития: новые возможности по созданию более открытых, производительных, масштабируемых, надежных и живучих интеллектуальных систем.



Эволюция моделей и методов VM: самообучение агентов из опыта

№ пп	Наименование	Краткое описание	Комментарий
1.	Hard-Coded Agents: правила принятия решений агентами жестко запрограммированы в коде	Логика агентов жестко прошита в код, где обычно наглядно представлена «объектная модель» мира (прообраз онтологии).	Высокая стоимость доработок
2.	Ontology-Driven Agents: агенты с возможностью ручной настройки через онтологию (Decision Making Language для настройки точек принятия решений)	Обеспечивается возможность настройки логики агентов на основе онтологий. Классы понятий и отношений используются для точек принятия решений агентами (выбор заказом ресурса, выбор заправки грузовиком и т.д.).	Снижение трудоемкости и стоимости на доработку логики работы агентов
3.	Learning Agents: агенты с автоматическим обучением из опыта	Рассматриваются различные модели и методы обучения из опыта агентами (Reinforced Learning, Neuro-Networks, кластеризация и др.) и их влияние на качество построения расписаний.	Возможность автоматические пополнять знания системы и менять логику работы системы

Направление развития: создание полностью интеллектуальной системы управления ресурсами с самообучением. Например, если пять раз назначили микронную операцию на рабочего А и пять раз получили в результате брак – не надо в шестой раз назначать такого типа задачу на того же рабочего).



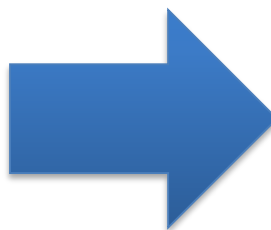
БАЗА ЗНАНИЙ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЙ

Традиционные формы
представления информации:
(отчеты, книги, таблицы и т.д.)



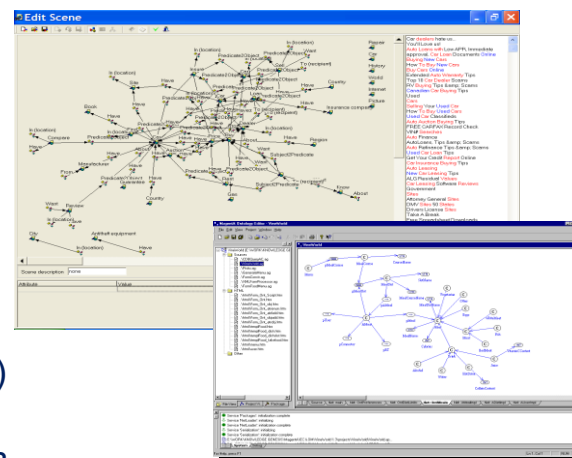
- Таблицы справочных данных
- Аналитические отчеты
- Условия применения
- Результаты полевых испытаний
- Советы и рекомендации
- Случаи из практики
- Цены на продукцию и услуги

**Переход к новым
формам
представления
информации,
удобным для
обработки на
компьютере**



Концепция Semantic Web
(семантического Интернета)
предполагает создание
семантической сети классов
объектов и отношений для
построения модели знаний
предметной области

Семантические сети –
компьютерные модели знаний
предметной области



Примеры экранов конструкторов онтологий

База знаний может содержать сведения об изделиях и техпроцессах, оборудовании и материалах, компетенциях рабочих и других особенностях производства, которых нет в обычных базах данных, документах и других источниках



База знаний предприятия на основе онтологии предметной области

Конструктор БЗ

База знаний

Онтологии

- 01 - Онтология планирования
- 02 - Онтология производства
- 99 - Онтология ТОиР

Модели

- 01 - Модель ИАЗ
- 02 - Модель ГПН
- 04 - Модель TRA
- 04 - Модель АСПОС
- 05 - Модель ЦУП

Сцены



3. Примеры внедрений промышленных интеллектуальных систем для решения сложных задач управления ресурсами

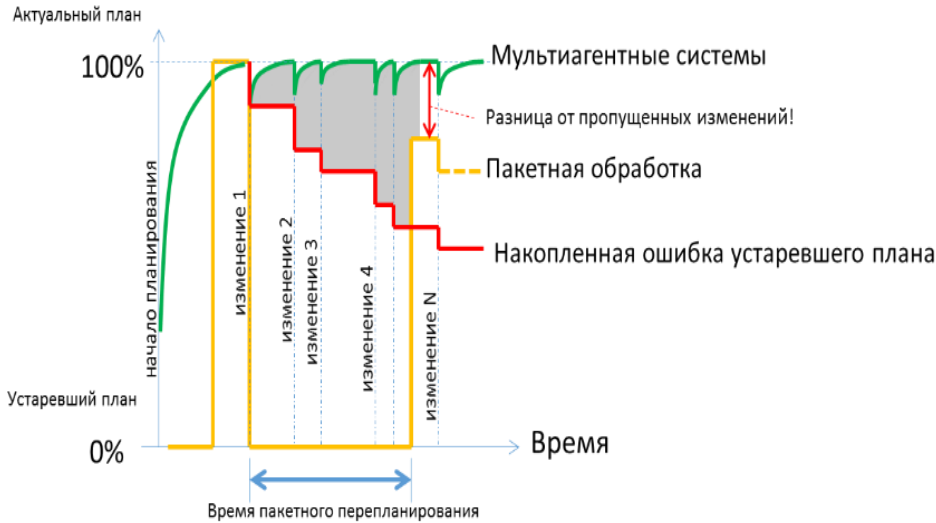


Результаты внедрения МАС управления ресурсами

Продукт	Клиент	Результаты и ценность для клиента
Smart Aerospace	Ракетно-космическая корпорация «Энергия»	<ul style="list-style-type: none"> Действует система для 8 диспетчеров и 120 других пользователей для подачи топлива, воды, продуктов питания и т. д. Ускорение планирования полетов в 4-5 раз. Моделирование наихудших сценариев для оценки рисков.
Smart Trucks	Prologics, Lorry, Monopoly, Trasko, Trans-Terminal, etc.	<ul style="list-style-type: none"> Увеличение количества заказов - до 3-5%; Сокращение просроченных поставок - до 5%; Повышение эффективности использования ресурсов - 5-10%.
Smart Factory	ТяжМаш, Axion-Holding, Airbus, Иркут, АвиаАгрегат, Кузнецов	<p>Axion-Holding:</p> <ul style="list-style-type: none"> Увеличение производительности цеха - 5-10%. Экономия на одном цехе по производству инструментов составляет 7 человеко-месяцев в месяц.
Smart Field Services	Самарская Газовая Компания, Волгоградская компания водоснабжения, Far East Service Company	<p>Samara Gas Company:</p> <ul style="list-style-type: none"> Сокращение времени реакции - до 5-7 раз. Повышение эффективности обслуживания - до 40% (12 заказов в день вместо 7 в прошлом).
Smart Deliveries of Food	Instamart (Москва)	<ul style="list-style-type: none"> Сокращение времени сборки заказа на 15%. Сокращение задержек при доставке клиентам на 22%.
Smart Supply Networks	Lego (Chicago outlets), Coca-Cola (Germany), Siberian Coal Mining, "Газпромнефть"	<p>Lego (US):</p> <ul style="list-style-type: none"> Увеличение доходности - до 18%.. <p>Coca-Cola, Germany:</p> <ul style="list-style-type: none"> Увеличение сроков доставки заказов - до 7%. Экономия на транспорте - до 20%.
Smart Projects	Ракетно-космическая корпорация «Энергия», Министерство экономики Самарской области	<ul style="list-style-type: none"> Полная прозрачность проектов: от годовых планов доставки в контактах - до ежедневных планов отделов и сотрудников. Сокращение расходов - 5-10% Увеличение количества проектов, реализованных в рамках бюджета и в срок - на 15%.
Smart Railways	РЖД (регионы Москвы, Санкт-Петербурга и Сибирь-Байкал)	<ul style="list-style-type: none"> Сокращение задержек железнодорожного поезда - до 15-25%. Более быстрая реакция на события - в 2-3 раза. Увеличение скорости поездов по Байкальскому полигону - до 3-5%.



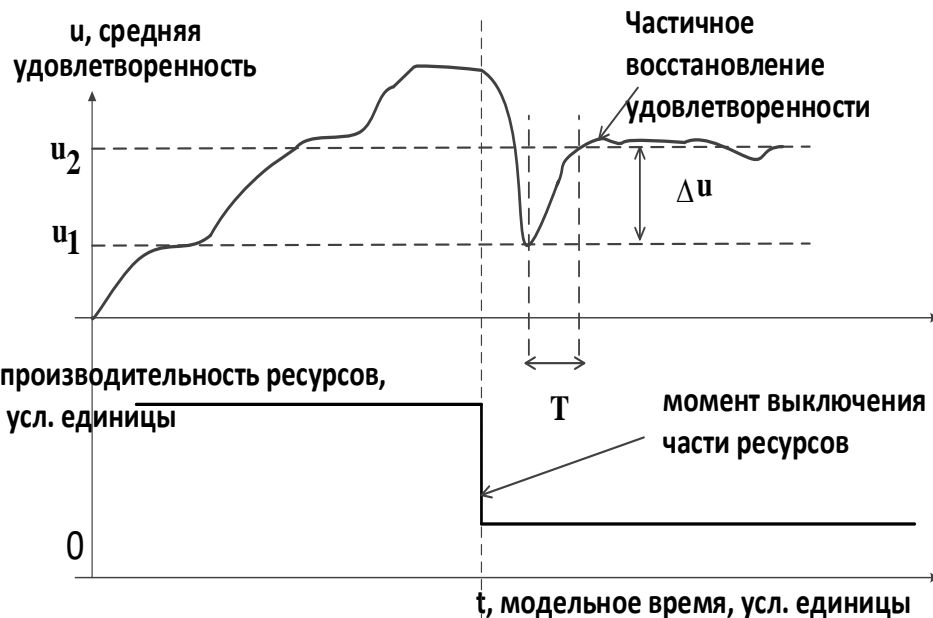
Оценка эффекта от адаптивности



Адаптивность системы означает изменение связей между заказами, ресурсами, задачами и продуктами – например, по событию отключения части ресурсов:

$$u(t) = \frac{\sum_j u_j^{task}(t) + \sum_l u_l^{res}(t)}{M(t) + N(t)}$$

где u_j^{task} – удовлетворенность агента j-й задачи, u_l^{res} – удовлетворенность агента ресурса l, N(t) и M(t) – число агентов задач и ресурсов.



После момента максимального спада средней удовлетворенности до уровня u_1 через время T MAC приходит к новому квазиравновесному состоянию u_2 . Степень адаптивности

$$\gamma = (u_2 - u_1) \cdot \frac{1}{T}$$

Подобный переходный процесс может наблюдаться не только при выходе из строя ресурсов, но и появлении новых заказов.



4. Полученный опыт, трудности разработки и преимущества для предприятий



Бизнес трудности разработки

1. Управление корпоративными ресурсами является критически важным для бизнеса, и поэтому эта область все еще очень консервативна и осторожна в принятии новых решений ИИ.
2. Разработка рассматриваемых систем требует высококвалифицированных разработчиков, экспертов и программистов, занимает много времени, требует продолжительного тестирования и т.д.
3. Большая часть корпоративных знаний для принятия решений обычно скрыта и для выявления требует прямой связи «на земле» с диспетчерами, инженерами, рабочими, водителями и другими участниками.
4. Значительная часть усилий связана с разработкой пользовательских интерфейсов, в особенности, в случае веб-разработки.
5. Дальнейшее развитие требует разработки цифровых платформ и экосистем умных сервисов с выходом на мобильные приложения для доступа к участникам в реальном времени.



Технологические трудности разработки

- Трудно оценить, насколько мы далеки от «оптимального» решения;
- Результаты зависят от истории возникновения событий;
- Эффект бабочки: небольшие изменения приводят к неожиданно большой реакции;
- Реакция системы может замедлиться в случае перехода между состояниями равновесия;
- В случае перезапуска системы результат планирования может оказаться другим;
- Трудно «откатить» принятые решения;
- Взаимодействие с пользователями в режиме реального времени становится сложным;
- Система может стать слишком «нервной» во время перепланирования;
- Решение трудно объяснить пользователю (потеря причинности) при высокой размерности.



Преимущества для предприятий

1. Решение сложных проблем управления предприятиями, включая этапы распределения, планирования, оптимизации и контроля ресурсов.
2. Повышение качества производства продукции и оказания услуг для конечных пользователей (индивидуальный подход);
3. Повышение эффективности за счет перехода к реальному времени и снижению затрат на производства продукции и оказания услуг для пользователей;
4. Формализация и интеграция знаний для принятия решений – нового ключевого интеллектуального ресурса предприятий в 21 веке;
5. Повышение прозрачности, оперативности в реакции на события, гибкости в изменениях планов при управлении ресурсами;
6. Снижение трудоемкости управления и уменьшение негативного человеческого фактора при распределении ресурсов.
7. Создание собственной масштабируемой программной платформы для разработки и развития ИИ систем управления ресурсами.



Как измерить экономический эффект от перехода к принятию решений в реальном времени

- 1. Прямые офисные затраты труда диспетчеров, менеджеров и специалистов** на построение и постоянную корректировку плана в реальном времени:
 - Начинают работать обычно не сразу, когда событие случилось (всегда есть потеря времени) – машина включается сразу;
 - Работают над каждым событием N минут (сложное событие – до 40 минут) – машина делает быстрее, эффект равен ставке зарплаты на число сэкономленных минут (при этом обычно непредвиденных событий десятки и сотни в день);
 - Не учитывает весь контекст ситуации и обычно действует «по накатанной» – теряем имевшиеся варианты для более эффективных решений и прибыли;
 - Нужен постоянный контроль: люди делают ошибки или обманывают и отдают заказы «своим» без учета интересов компании и т.д.;
 - Возможность существенно сократить численность управленцев;
 - Затраты на постоянное обучение и переобучение специалистов.
- 2. Прямые физические затраты, связанные с заказами и ресурсами предприятия** – повышение эффективности бизнеса:
 - Сокращение затрат на «простой» или «холостой ход» ресурсов (нет заказов);
 - Сокращение потери заказов в пик, когда не хватает ресурсов для заказов;
 - Выигрыш за счет рационализации использования ресурсов, маршрутизации и т.д.;
 - Выигрыш за счет адаптивного встраивания заказов в план по дороге «на лету»;
 - Снижение затрат на уплату пени и штрафов в случае задержки или срыва заказов;
 - Можно держать меньше товарных запасов на складе и сократить площади складов;
 - Скорость в реакции на события – для опережения конкурентов и захвата новых заказов;
 - Повышение удовлетворенности клиентов качеством и сроками работы исполнителя.



5. Выводы

- Мультиагентные технологии уже сегодня используются в промышленных интеллектуальных системах управления ресурсами;
- Разработанные мультиагентные технологии обеспечивают возможность оперативной и гибкой реакции на события для перехода предприятий к экономике реального времени, позволяя поднять эффективность использования ресурсов от 5-7% - до 15-40%;
- Тренд на недетерминированные процессы с возможностью сочетания централизованного и распределенного подходов в части Guided Self-Organization (мягкая «направляемая самоорганизация»);
- Одновременно, МАС – основа для создания и исследования «Эмерджентного интеллекта» в цифровых эко-системах;
- Результаты исследований и разработок говорят о перспективах мультиагентной технологии для создания интеллектуальных систем самого широкого круга применений.



Спасибо за внимание!

Скобелев Петр Олегович, д.т.н.

НПК «Разумные решения»

Группа компаний «Генезис знаний»

E-mail: skobelev@kg.ru

Моб.: +7 (902) 372–32-02



Подробнее о нашей истории и разработках
- в статье Ирика Имамудинова

«Организация мыслящего роя»

в журнале «Эксперт» (ноябрь 2014):

<http://expert.ru/expert/2014/48/organizatsiya-myislyaschego-roya/>

- и в видеосюжете Программы «Технопарк»
на канале «Россия 24»:

<http://www.youtube.com/watch?v=qhCmbBU3jkU>

