

УДК 004.94

ПРИМЕНЕНИЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА В ГИБРИДНЫХ СИСТЕМАХ ИМИТАЦИОННО-МУЛЬТИАГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ

К.А. Аксенов (Екатеринбург)

Введение

С задачами анализа и синтеза организационно-технических систем (ОТС) сталкивается любое предприятие, ставящее перед собой цель повышения конкурентоспособности и инвестиционной привлекательности в условиях рыночной экономики. К таким задачам можно отнести составление бизнес-плана модернизации предприятия, структурную реорганизацию предприятия, обеспечение жизненного цикла изделия или услуги, составление и выполнение различных проектов: от закупок оборудования и сырья до увеличения рынка сбыта продукции. Компьютерная поддержка процессов решения подобных задач на основе разных типов моделей (имитационных [1-3], экспертных [4, 5], машинного обучения, агентных [6-8], сетевого планирования [9-11], гибридных [12-14]) обеспечивает выработку наиболее перспективных и рациональных решений в условиях быстро изменяющихся условий внешней среды. Примерами ОТС могут служить производственные предприятия, мультисервисные сети связи (МСС), высокотехнологичные предприятия различных отраслей, проектные организации.

К процессам ОТС относятся такие классы процессов, как бизнес-процессы, производственные и технологические процессы, процессы логистики, процессы принятия решений. Для формализации процессов ОТС может быть применен подход процессов преобразования ресурсов (ППР).

Мультиагентный процесс преобразования ресурсов

Процесс (операция) ППР [14] представляет собой дискретный преобразователь входных ресурсов Res_{In} в выходные Res_{Out} при условии наличия свободных средств $Mech$ выполнения и срабатывании условий запуска процесса U . Процесс ППР может содержать агентов, которые представляют собой модель ЛПР (рис. 1). Каждый агент имеет базу знаний (knowledge base, KB), в которой хранится информация по действиям агента в различных ситуациях, в том числе, по запуску операций на выполнение. К основным элементам мультиагентного процесса преобразования ресурсов (МППР) относятся: операции, агенты, источники и приемники ресурсов, ресурсы, средства, заявки [14]. При этом ресурсы потребляются (уменьшаются) при выполнении операции, средства используются (блокируются), заявки обрабатываются (задерживаются на время выполнения операции). По окончании выполнения операции заблокированные средства освобождаются.

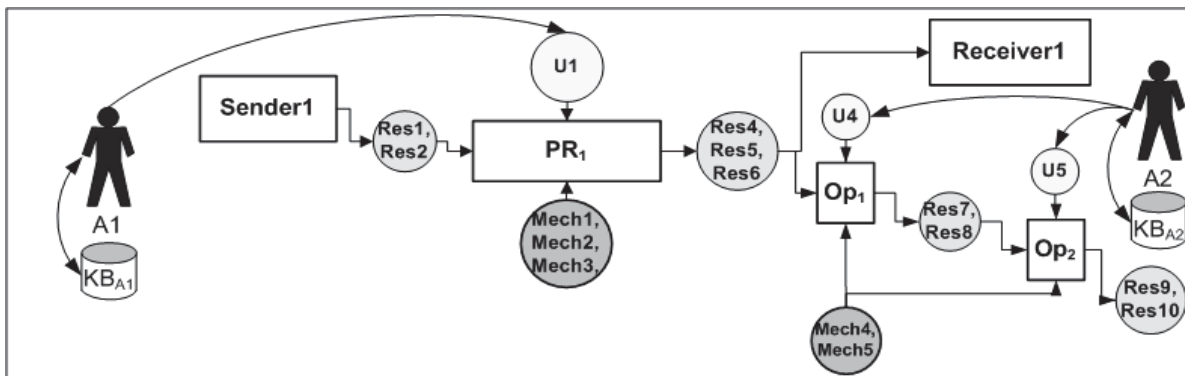


Рис. 1. Схема мультиагентного процесса преобразования ресурсов

Агентам в ОТС соответствуют элементы системы управления или модели лиц, принимающих решения. Для формализации моделей агентов может быть использованы подходы: диаграммы состояний, автоматы, сети Петри, модели представления знаний, машинного обучения, нейронные сети).

Применимость агентного подхода в комплексах моделирования и принятия решений

Агентно-ориентированный подход в разных аспектах применяется в различных практических задачах, интеллектуальных системах принятия решений и средах гибридного имитационного моделирования.

Так к среде многоподходного моделирования AnyLogic реализовано агентное моделирование: поведение агента (экземпляра или класса) описывается диаграммой состояний языка UML [15]. В системе динамического моделирования ситуаций (СДМС) BPsim.MAS [14] и автоматизированной системе выпуска металлургической продукции (АС ВМП) [14] модели поведения агентов описываются продукционной базой знаний (в виде правил вида «Если (...), то (...)). Кроме этого в BPsim.MAS модель поведения агента может быть описана в виде диаграммы активности языка UML.

В ряде интеллектуальных систем агентный подход применяется в «чистом/классическом» виде (без интеграции с имитационным моделированием). В системах Magenta и SmartTrack [8, 16] агенты описываются онтологией, а задача принятия решений реализуется посредством процедуры матчинга, когда решение определяется в процессе взаимодействия (коммуникации) агентов.

В целом на тип модели агента, с помощью которой он может быть формализован, накладывает определенные требования та предметная область, для которой он разрабатывается. Для задач проектирования и планирования [5, 13-14] в системе поддержки принятия решений BPsim.DSS для описания модели агентов используется фреймовая модель представления знаний.

Кроме того, агентный подход может эффективно применяться для задачи автоматизации в целом. В вопросно-ответной системе ТВИН [17] агентный подход используется для разработки чат-ботов и роботов обзвона. Чат-бот или робот обзвона решает задачу коммуникации с абонентом (пользователем) и сбор данных от пользователей (ВОС ТВИН), Средства интеграции (API) ТВИН позволяет интегрировать компонент ВОС (агента) с CRM-системой или BPM-системой.

В интеллектуальных системах, разрабатываемых под руководством Скобелева П.О., применяется подход сетей потребностей и возможностей [8, 16], агенты используются для коммуникации, принятия решений и децентрализованного управления.

Разработка принципов построения мультиагентных имитационных моделей

При построении имитационной модели мультиагентного процесса преобразования ресурсов строятся следующие подмодели:

1. модель генерации объектов / транзактов (заказов / проектов / единиц производимой продукции или предоставляемых услуг); транзакт в модели МППР представим в виде экземпляра заявки с набором системных и пользовательских атрибутов: к системным атрибутам относятся имя текущего узла-владельца заявки и общее число сгенерированных экземпляров заявки, пользовательские атрибуты могут быть заданы числовым или строковым параметром и описывать, например, длительность обработки заявки текущим узлом модели;

2. модель процессов обработки и прохождения объектов; данные процессы связаны с обработкой единиц продукции на оборудовании, транспортировкой и

выполнением заказов на предоставление продукции или услуг; в модели МППР маршрут (технологический и логистический) обработки заявки формируется цепочкой блоков, состоящих из преобразователей: операций и агентов;

3. модель поставок складированных ресурсов: производственного сырья, исходных материалов и полуфабрикатов; в модели МППР маршрут поставки ресурсов формируется цепочкой блоков, состоящих из операций и агентов.

4. модель работы средств – персонала, оборудования, транспортных средств – с учетом возможности лизинга и привлечения субподрядных средств.

Специфика предметной области организационно-технических систем и бизнес-процессов для моделирования набора объектов диктует следующие требования и соответствующие им правила построения мультиагентной имитационной модели:

а) необходимо задавать ограничение по объему потребляемых складированных ресурсов в процессе производства (например, денежных ресурсов); в случае превышения ограничения на суммарные затраты данный объект становится нерентабельным;

б) необходимо определять ограничение по объему используемых средств – собственных и субподрядных (лизинговых); в случае превышения ограничения целевой объект цепочки бизнес-процессов становится нерентабельным;

в) при необходимости следует использовать стратегию обработки объектов «первым пришел – первым вышел», поскольку задержки при обработке отдельного объекта приводят к дополнительным затратам: финансовым, материальным, затратам энергии, а также могут приводить к нарушениям технологической карты обработки объекта, например, в случае сталеплавильного производства задержка при разливке стали ведет к ее остыванию и невозможности продолжения разливки;

г) в случае возможности параллельного во времени выполнения этапов производства необходимо выделять работы, лежащие на критическом пути (например, с помощью метода критического пути), и для соответствующих узлов имитационной модели устанавливать максимальный приоритет выполнения;

д) процессы принятия решений, а также процессы управления и диспетчеризации должны иметь наивысший приоритет и запускаться на каждом такте модельного времени;

е) при построении моделей процессов реальной системы обязательны этапы обследования предметной области и хронометража операций;

ж) при наличии на исследуемом объекте (процессе) актуальной информационной системы рекомендуется использовать при построении модели реальные данные;

з) на этапе построения подмоделей ЛПР (в виде агентов на основе моделей со знаниями) обязателен этап проверки непротиворечивости знаний и используемых эвристик.

Применение разработанных принципов построения имитационных моделей и метода анализа и синтеза МППР позволяет решать задачу поиска и устранения узких мест на ресурсах.

При использовании в модели МППР и в предметной области субподрядных средств (лизинг) необходимо разрабатывать подмодель субподряда, а также учитывать ограничения по объему субподрядных работ и субподрядных средств. Так в случае превышения ограничения на суммарные затраты данный процесс или объект (заказ, проект) становится нерентабельным.

В подмодели субподряда существует две возможности описания распределения собственных и субподрядных средств: либо сторонние средства привлекаются для

обработки заявки текущим узлом на все время обработки, либо сторонние средства привлекаются частично только на время нехватки собственных средств.

Мультиагентная имитационная модель, включающая подмодель субподряда, обладает следующими особенностями:

а) по результатам проведения экспериментов возможен анализируется загрузка средств. Если загрузка средств (коэффициент использования достигает или приближается к единице), то происходит оценка требуемого объема средств на основе анализа очереди. В дальнейшем принимается решение о корректировке объема средств, как собственных, так и субподрядных средств;

б) после устранения узких мест на средствах (за счет увеличения количества собственных и/или субподрядных средств и повышения пропускной способности) можно считать план обработки потока объектов эффективным по срокам выполнения.

Для реальных процессов существуют следующие ограничения применения подмодели субподряда: использование сторонних средств не всегда допустимо, данные средства могут иметь ограничения по объему и времени использования, не всегда существует возможность привлечения субподрядных средств для выполнения части операций. Применение агентов субподряда позволяет решить задачу узких мест на средствах мультиагентной имитационной модели.

Создание гибридной экспертно-динамической модели процессов ППР

Основными объектами модели МППР являются: операции (*Op*); ресурсы (*Res*); команды управления (*U*); средства (*Mech*); процессы (*Pr*); источники (*Sender*) ресурсов; приемники ресурсов (*Receiver*); перекрестки (*Junction*); параметры (*P*); агенты (*Agent*) или модели лиц, принимающих решения; среда (*Env*); состояния среды (*State*); альтернативы (*Alt*); оценка альтернативы (*Y_{Alt}*); целевые функции (*OF*). Описание причинно-следственных связей между элементами преобразования и ресурсами задается объектом «связь». Существование агентов предполагает наличие ситуаций (*Situation*) и решений (*Decision*). Следует уточнить: понятие «ресурс» модели МППР соотносится с понятием «складируемый ресурс» в теории составления расписаний, а понятие «средство» модели МППР – с понятием «нескладируемый ресурс» в теории составления расписаний. Далее будет применяться терминология нотации МППР.

Новая модель расширена моделями поведения реактивно-интеллектуальных агентов (РИА) и моделью логического вывода по базе знаний интеллектуального агента (ИА). РИА применяются для описания моделей поведения ЛПР и управления процессами ППР на основе логического вывода по продукционной базе знаний. ИА представляют собой агентов, знания которых хранятся во фреймовой базе знаний. Данные агенты применяются для построения проблемно-ориентированных интеллектуальных систем на основе аппарата фреймовых экспертных систем с использованием модификации диаграммы последовательности языка UML – диаграммы поиска решений.

Гибридную экспертно-динамическую модель ППР можно представить в следующем виде:

$$M = \langle Name_M, Desc_M, \{Ob_M\}, \{Relation_M\}, A^{self}, t_M, Env, Decision, ABottleNeck, ASubContr, ADecSearch \rangle, \quad (1)$$

где *Name_M* – имя модели;

Desc_M – описание модели;

{Ob_M} – множество объектов модели: агенты, коалиции, ресурсы, средства, преобразователи, сообщения, заявки, цели, стратегии, работы, планы выполнения работ;

{Relation_M} – множество связей модели;

A^{self} – собственные атрибуты модели;

t_M – время в модели;

Env – модель внешней среды;

$Decision$ – модель решений.

Перейдем к описанию новых объектов модели.

Модель МППР расширена следующими объектами:

- структура модели, которая соответствует определенному набору процессов и запасам ресурсов (TM);
- расписание выполнения процессов, которое соответствует определенному распределению собственных и субподрядных средств по процессам (S);
- время простоя процесса из-за нехватки входных ресурсов (T_{Idle_Pr});
- очередь заявок к процессу (Q_{Pr});
- коэффициент использования ресурсов (Z_{Res});
- коэффициент использования средств (Z_{Mech});
- РИА поиска и устранения узких мест на ресурсах и операциях ($A_{BottleNeck}$);
- РИА субподряда, предназначенный для поиска и устранения узких мест на средствах за счет привлечение субподрядных средств ($A_{SubContr}$);
- ИА поиска решения, предназначенный для выбора набора значений входных параметров модели из множества альтернатив ($A_{DecSearch}$).

Модель РИА поиска и устранения узких мест на ресурсах и операциях представим следующим образом:

$$A_{BottleNeck} = \langle Ag_BN_name, G_Ag_BN, prior_Ag_BN, Ob_In_Ag_BN, Ob_Out_Ag_BN, PB_Ag_BN \rangle, \quad (2)$$

где Ag_BN_name – имя агента поиска узких мест;

G_Ag_BN – цели агента поиска узких мест;

$prior_Ag_BN$ – приоритеты агента поиска узких мест;

$Ob_In_Ag_BN$ – множество входных объектов, которые участвуют в антецеденте продукционного правила агента: сообщения, время простоя процесса из-за нехватки входных ресурсов T_{Idle_Pr} , очередь заявок к процессу Q_{Pr} , коэффициент использования ресурсов Z_{Res} ;

$Ob_Out_Ag_BN$ – множество выходных объектов, которые участвуют в консеквенте продукционного правила агента: ресурсы, процессы, сообщения, структура модели TM ;

PB_Ag_BN – сценарий поведения агента поиска узких мест, которых хранится в продукционной базе.

Модель РИА субподряда представим следующим образом:

$$A_{SubContr} = \langle Ag_SC_name, G_Ag_SC, prior_Ag_SC, Ob_In_Ag_SC, Ob_Out_Ag_SC, PB_Ag_SC \rangle, \quad (3)$$

где Ag_SC_name – имя агента субподряда;

G_Ag_SC – цели агента субподряда;

$prior_Ag_SC$ – приоритеты агента субподряда;

$Ob_In_Ag_SC$ – множество входных объектов, которые участвуют в антецеденте продукционного правила агента: сообщения, коэффициент использования собственных средств Z_{Mech} , объем V_{MEchSC} и стоимость S_{MEchSC} субподрядных средств;

$Ob_Out_Ag_SC$ – множество выходных объектов, которые участвуют в консеквенте продукционного правила агента: календарный план (расписание) процессов S , средства, сообщения;

PB_Ag_SC – сценарий поведения агента субподряда, которых хранится в продукционной базе.

Модель ИА поиска решения представим следующим образом:

$$A_{DecSearch} = \langle Ag_DS_name, G_Ag_DS, prior_Ag_DS, Ob_In_Ag_DS, Ob_Out_Ag_DS, FB_Ag_DS \rangle, \quad (4)$$

где Ag_DS_name – имя агента поиска решения;

G_Ag_DS – цели агента поиска решения;

$prior_Ag_DS$ – приоритеты агента поиска решения;

$Ob_In_Ag_DS$ – множество входных объектов, которые участвуют в поиске решения по фреймовой базе знаний агента: сообщения, ресурсы, средства, преобразователи (процессы), сигналы, заявки;

$Ob_Out_Ag_DS$ – множество выходных объектов, значения которых формируются по результатам вывода по фреймовой базе знаний агента: параметры модели P , сообщения;

FB_Ag_DS – сценарий поведения агента поиска решения, который хранится в виде диаграммы поиска решения.

Определим структуру правила работы РИА поиска и устранения узких мест на ресурсах и процессах:

$$RULE^{Ag_BN} = \langle Ca(Ob_In_Ag_BN), A_{SearchBN}(Ca), A_{Reeng}(Ca) \rangle, \quad (5)$$

где $Ca(Ob_In_Ag_BN)$ – условие поиска узких мест на ресурсах и процессах, связанное с превышением значений выходных характеристик T_{Idle_Pr} , Q_{Pr} и Z_{Res} заданных пороговых значений;

$A_{SearchBN}(Ca)$ – действия по поиску узких мест на ресурсах и процессах;

$A_{Reeng}(Ca)$ – действия по проведению реинжиниринга исходной модели, заключающиеся в выполнении структурного и параметрического синтеза элементов модели с целью устранения найденных узких мест на ресурсах и процессах.

Разработка агентной архитектуры МППР

За основу агентной архитектуры информационной технологии анализа и синтеза МППР взята архитектура гибридного агента.

Различают два основных класса архитектур агентов:

1) архитектура «интеллектуального агента», которая базируется на принципах и методах искусственного интеллекта, то есть систем, основанных на знаниях («deliberative agent architecture», «архитектура разумного агента»);

2) архитектура «реактивного агента», основанная на поведении («reactive architecture») или основанная на реакции системы на события внешнего мира. Сейчас среди разработанных архитектур не существует таких, о которых можно сказать, что они являются чисто поведенческими или основаны только на знаниях. Любая из разработанных архитектур является гибридной [20], имея черты от архитектур обоих типов.

Архитектура состоит из блоков: интерфейса с внешним миром, реактивной подсистемы, планирующей подсистемы, подсистемы кооперации с другими агентами и базы знаний.

Интерфейс с внешним миром определяет возможности агента по восприятию объектов или событий внешнего мира, воздействия на него и средства коммуникации.

Реактивная подсистема использует базовые возможности агента по реактивному поведению, а также частично использует знания агента процедурного характера.

Компонента, ответственная за планирование, содержит механизм планирования, позволяющий строить локальные планы агента (планы, не связанные с кооперативным поведением).

Компонента, ответственная за кооперацию агентов, участвует в конструировании планов совместного поведения агентов и коалиций для достижения некоторых общих целей.

Архитектура гибридного агента и информационной технологии анализа и синтеза МППР представлена на рис. 2.

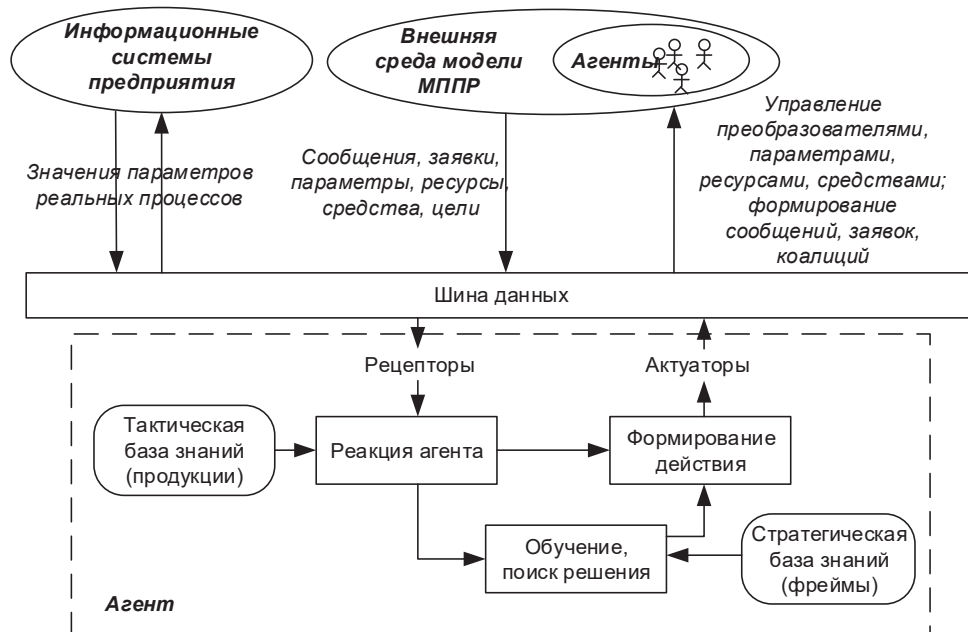


Рис. 2. Агентно-ориентированная архитектура МППР

Все компоненты агентно-ориентированной архитектуры МППР связаны через общую структуру управления и используют общую базу знаний. В архитектуре модели ППР общей базой знаний является совокупность тактической базы знаний, хранящей производственные правила агента, и стратегической базы знаний на фреймах. Гибридная архитектура прототипа информационной технологии анализа и синтеза МППР реализована на основе интеграции программных продуктов BPsim.MAS, BPsim.DSS и разработанных визардов интеграции модели МППР и концептуальной модели предметной области (КМПО).

Агентно-ориентированная архитектура анализа и синтеза МППР включает в себя три слоя: 1) хранение данных; 2) обмен данными с корпоративными информационными системами (КИС) предприятия и локальными базами данных (БД); 3) агентное моделирование и принятие решения по формированию управляющего воздействия на модель процессов или на реальные процессы (объект управления).

Первый слой архитектуры прототипа ИТ анализа и синтеза предназначен для хранения данных в локальной базе данных и общей базе знаний для использования данных в процессе принятия решений. Хранение осуществляется с помощью системы управления базами данных MS SQL Server.

Второй слой архитектуры прототипа ИТ анализа и синтеза предназначен для обмена данными с информационными системами предприятия: КИС предприятия, локальными БД, содержащими, в том числе, данные разработанных моделей МППР. Обмен основан на применении аналога шины данных.

Агенты анализа и синтеза МППР включают в себя рецепторы и актуаторы для осуществления обмена информацией с внешними системами. Рецепторы предназначены для формирования antecedents правил реакции агентов на воздействие внешней среды; актуаторы предназначены для формирования управляющего воздействия на внешнюю среду по результатам проведения агентом поиска решения задачи анализа и синтеза.

Третий слой архитектуры прототипа ИТ анализа и синтеза предназначен для осуществления следующих действий: разработки моделей МППР исследуемых процессов, разработки и настройки моделей поиска решения поставленной задачи,

решении задач анализа и синтеза на основе вывода по стратегической базе знаний и модели МППР.

Программная реализация технологии принятия решений МППР

Технология анализа и синтеза МППР и поддержки принятия решений реализован на основе программных продуктов Vpsim с помощью технологии программных помощников – визардов.

Визард (программный агент-помощник, мастер) – это интерактивная программа с графическим интерфейсом пользователя, которая визуальнo представляет собой последовательно сменяющие друг друга диалоговые окна. Визард предназначен для выполнения задачи, которую можно разбить на этапы (шаги).

В настоящее время мастера получили широкое распространение среди программного обеспечения благодаря их удобному диалоговому интерфейсу и выполняемым функциям. Визарды предоставляют системам, в которые они встроены, следующие преимущества: универсальность, расширение функционала, простоту в освоении и использовании – что в совокупности оказывает существенное влияние на выбор пользователей.

Схема интеграции продуктов семейства Vpsim (СДМС Vpsim.MAS и СППР Vpsim.DSS) посредством визардов приведена на рис. 3.



Рис. 3. Схема интеграции продуктов семейства Vpsim посредством визардов

Разработка модели МППР и построение модели КМПО может осуществляться аналитиком или разработчиком (программистом) с нуля или непрограммирующим предметным специалистом с помощью визардов построения моделей МППР и КМПО.

Схема применения продуктов Vpsim при построении моделей МППР на основе гибридной архитектуры агента показана на рис. 4.

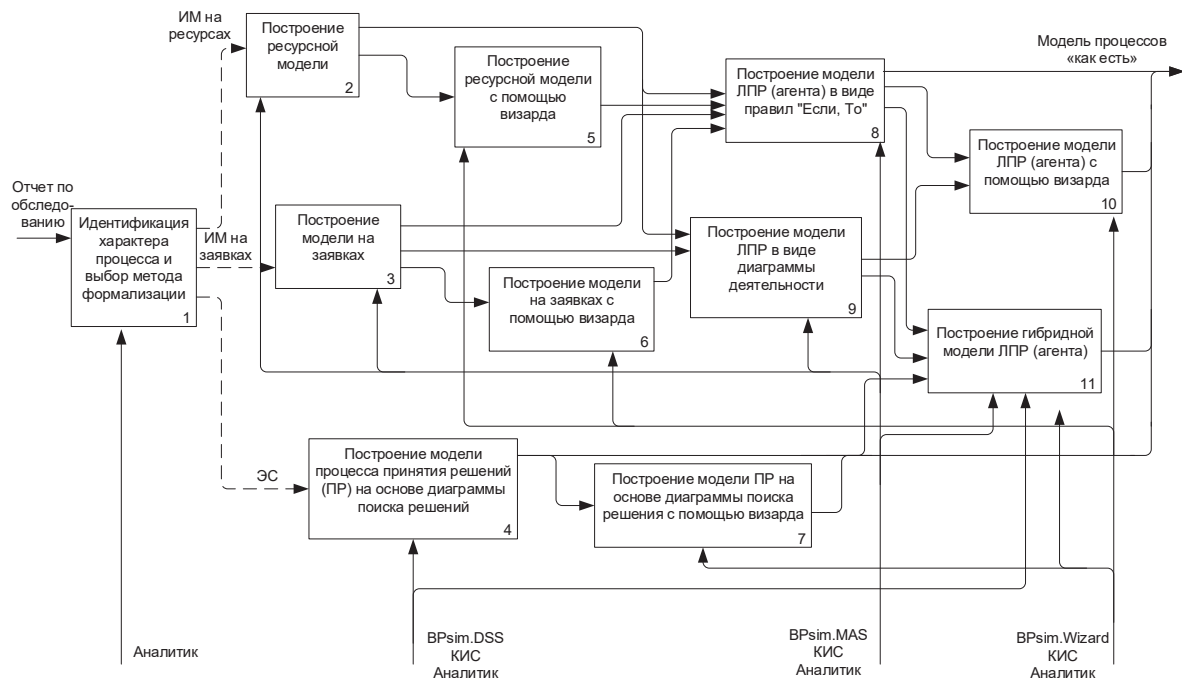


Рис. 4. Применение продуктов BPsim при построении моделей МППР на основе гибридной архитектуры агента

Гибридная агентная архитектура МППР также программно была реализована в автоматизированной системе выпуска металлургической продукции [14, 15, 17].

АС ВМП может быть представлена как мультиагентная система, агентный подход может быть применен для задач автоматизации процессов моделирования, управления и принятия решений:

1) сбор исходных данных и двусторонний обмен информацией (модуль ОДАСП АС ВМП). В АС ВМП модуль ОДАСП, обеспечивающий двусторонний обмен АС ВМП с другими разнородными гетерогенными информационными системами предприятия, реализован в виде агентов для управления процессом, балансировки нагрузки и обеспечения надежности [14];

2) для задач подготовки данных и настройки параметров модели для последующего моделирования или принятия решений (например, модуль подготовки данных АС ВМП) [18-19];

3) модуль интеграции моделей управляет моделями для их использования в задачах в реальном масштабе времени (мониторинг, диспетчеризация, управление процессом) [14];

4) модуль оптимизации процессов предприятия реализует функционал распараллеливания имитационных экспериментов [14].

АС ВМП состоит из двух подсистем: подсистемы анализа данных и подсистемы моделирования. Подсистема анализа данных включает в себя: хранилище данных (ХД), конструктор запросов (КЗ); модуль обмена данными с автоматизированными системами предприятия (ОДАСП), предназначенный для обмена информацией с корпоративными системами предприятия.

Выводы

В ходе исследования разработаны принципы построения мультиагентных имитационных моделей для решения прикладных задач, направленных на повышение пропускной способности моделируемой системы, задач анализа и устранения узких мест, балансировки потребления ресурсов и использования средств.

Разработана трехслойная агент-ориентированная архитектура МППР, обеспечивающая хранение и двусторонний обмен данными с информационными системами предприятия, имитационное, мультиагентное, эволюционное моделирование и применение математических методов при решении задач анализа и синтеза исследуемых процессов. Архитектура и модель МППР реализованы в программном комплексе BPsim и АС ВМП.

Модель МППР и программные решения использовались для решения задач анализа и синтеза, совершенствования процессов планирования и принятия решений в областях металлургии [14, 15] и нефтепродуктообеспечения [5].

Целью дальнейших исследований является применение модели МППР и гибридных систем мультиагентного имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов.

Благодарности

Публикация осуществляется в рамках проекта «Редизайн дисциплины "Интеллектуальные и мультиагентные системы"», реализуемого победителем грантового конкурса для преподавателей 2024/2025 Стипендиальной программы Владимира Потанина.

Литература

1. **Devyatkov, V.V., Vlasov S.A., Devyatkov T.V.** Cloud technology in simulation studies: GPSS Cloud Project // Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management, and Control. – Saint Petersburg (Russia): IFAC, June 19-21, 2013. Vol. 7. Part 1. P. 637-641.
2. **Sokolov B.V., Pavlov A.N., Yusupov R.M., Ohtilev M.U., Potryasaev S.A.** Theoretical and technological foundations of complex objects proactive monitoring management and control // Proceedings of the Symposium Automated Systems and Technologies Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Leibniz Universität Hannover. 2015. P. 103-110.
3. **Solovyeva I., Sokolov B., Ivanov D.** Analysis of position optimization method applicability in supply chain management problem // 2015 International Conference "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP) 2015. P. 498-500.
4. Статические и динамические экспертные системы: учеб. пособие / Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, Е.Б. Кисель, М.Д. Шапот. М.: Финансы и статистика, 1996. 320 с.
5. **Aksyonov K., Antonova A., Aksyonova O.** A Method for planning the supply of petroleum products to filling stations based on multi-agent resource conversion processes. Lecture Notes in Electrical Engineering: Book Series. Том 986. Springer. 2023. P. 176-185. Chapter 18. (Advances in Automation IV). doi: 10.1007/978-3-031-22311-2_18 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-22311-2_18.
6. **Wooldridge, M., Jennings, N., Kinny, D.** The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design // Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 3. 2000. P. 285-312.
7. **Макаров В. Л.** Новый инструментарий в общественных науках – агент-ориентированные модели: общее описание и конкретные примеры / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин. – Текст : непосредственный // Экономика и управление. 2009. № 12. С. 13-25.
8. **Wittich, V. A., Skobelev P. O.,** Multi-agent interaction models for the design of the nets of requirements and capabilities in open systems, Autom. and Telem., vol. 1, pp. 177-185, Jan. 2003.
9. **Clark, C.E.** The PERT model for distribution of an activity time // Oper. Res. 1962, 10, PP. 405-406, doi:10.1287/opre.10.3.405.

10. **Shorikov, A.F., & Butsenko, E.V.** Optimal adaptive control of business planning processes based on network economic and mathematical modeling // Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences: 12th International On-line Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, AMiTaN S 2020 (Vol. 2302). [060013] (AIP Conference Proceedings; Vol. 2302). 2020. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0033584> (дата обращения 27.07.2022).
11. **Gimadi, E.K., Goncharov, E.N., Mishin, D.V.** On some implementations of solving the resource constrained project scheduling problems // Yugosl. J. Oper. Res. 2019, 29, 31–42, doi:10.2298/YJOR171115025G.
12. **Микони С. В., Соколов Б. В. Юсупов Р. М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов : монография. М. : РАН, 2018. 314 с. DOI:10.31857/S9785907036321000001
13. **Antonova A.S., Aksyonov K.A., Aksyonova O.P.** An imitation and heuristic method for scheduling with subcontracted resources. Mathematics 2021, 9(17), 2098; DOI: 10.3390/math9172098 - URL: <https://doi.org/10.3390/math9172098> . (дата обращения 27.07.2022).
14. **Аксенов К.А.** Гибридные системы имитационно-мультиагентного моделирования процессов преобразования ресурсов // «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2023: сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности / Под науч. ред. В.В. Девяткова. – Казань: Изд-во АН РТ, 2023. 866 с. ISBN 978-5-9690-1151-9. С. 209-218. <http://simulation.su/uploads /files/default/immod-2023-209-218.pdf>.
15. Среда многоподходного моделирования AnyLogic <https://www.anylogic.ru/>.
16. **Skobelev, P., Zhilyaev, A., Larukhin, V., Grachev, S., Simonova, E.** Ontology-based open multi-agent systems for adaptive resource management // In Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Valletta, Malta, 2020; pp. 127–135, doi:10.5220/0008896301270135.
17. **Aksyonov K.A., Sun Lina, Kalinin I.A.** Developing AI models using a code-free platform \ Proceedings 2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon 2025): book. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., P. 235-239 (Russia, Sochi. 24-28/03/2025). .<https://doi.org/10.1109/SmartIndustryCon 65166.2025.10986074> <https://ieeexplore.ieee.org/document/10986074/>
18. **Ponomareva, O., Porshnev, S., Borodin, A., & Mirvoda, S.** Data preparation module of automated metallurgical products production system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1047(1), [012003]. 2021. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1047/1/012003> (дата обращения 27.07.2022).
19. **Porshnev, S., Borodin A., Ponomareva, O., Mirvoda, S., & Chernova, O.** The development of a heterogeneous MP data model based on the ontological approach. Symmetry, 13(5), [813]. 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/sym13050813> (дата обращения 27.07.2022).
20. **Muller J.P., M. Pischel.** The Agent Architecture InteRRaP: Concept and Application, German Research Center for Artificial Intelligence (DFKI). 1993.