

УДК 004.94

ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННО-МУЛЬТИАГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ

Аксенов К. А. (Екатеринбург)

Введение

Данная работа посвящена разработке средств имитационного моделирования и принятия решений в области организационно-технических систем (ОТС) и мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР). Предметная область МППР охватывает такие классы процессов, как производственные, технологические, организационные, бизнес-процессы (БП) и цепочки поставок, ОТС.

Мультиагентная модель процессов преобразования ресурсов

Рассмотрим мультиагентную модель процесса преобразования ресурсов (МППР). Модель МППР разработана на основе следующих математических схем процессов: сетей Петри, систем массового обслуживания и моделей системной динамики, гибридных автоматов [1-2]. Основным объектом модели МППР является преобразователь ресурсов – непрерывная или дискретная операция преобразования входа (ресурсов, необходимых для выполнения процесса) в выход (продуктов – результатов выполнения процесса). Элемент (компонент) такого МППР или весь процесс представлен в виде структуры, включающей: вход, условие запуска, преобразование, средства преобразования, выход. В момент выполнения условия запуска уменьшается входной ресурс и захватываются средства. В момент окончания преобразования происходит увеличение выходного ресурса и освобождение средств [1-3].

Понятие агент соответствует аппаратно или программно реализованной сущности, которая способна действовать в интересах достижения целей, поставленных перед ней владельцем и/или пользователем, и которая обладает определенными интеллектуальными способностями [4-5], а также возможно автономное поведение [6-7]. В контексте модели МППР агенту соответствует объект с моделью поведения и/или модель лица, принимающего решения [3]. Активно теория агентов развивается коллективом под руководством Скобелева П.О. [6-7].

Производственные объекты технологических, логистических и организационных процессов характеризуются сложностью структуры и алгоритмов поведения, многопараметричностью, что приводит к сложности их моделей. Сложные МППР, с точки зрения структурного подхода, могут быть представлены в виде иерархии последовательных декомпозиций процесса на подпроцессы. Каждая декомпозиция представляет собой композицию (состав) более простых элементов процесса. Тем самым создается иерархическая-многоуровневая модель процесса. На самых нижних уровнях процесс может быть представлен с точностью до элементарных операций. К основным элементам модели МППР относятся следующие: операции (*Op*), ресурсы (*RES*), команды управления (*U*), средства (*MECH*), процессы (*PR*), источники (*Sender*) и приемники ресурсов (*Receiver*), перекрестки (*Junction*), цели (*G*), параметры (*P*), агенты (*Agent*). Отдельно выделены информационные типы ресурсов: сигналы (*Sig*) и заявки (*Order*). Агенты управляют объектами МППР и взаимодействуют между собой. Существование агентов предполагает наличие сообщений (*Message*), микроситуаций (*Mis*), макроситуаций (*Mas*), ситуаций (*Sit*) и решений (планов действий) (*Decision*) [1-2].

Под процессом преобразования ресурсов понимается непрерывная или дискретная операция (*Op*) преобразования входа (ресурсов, необходимых для

выполнения процесса) в выход (продуктов – результатов выполнения процесса). Элемент (компонент) такого МППР или весь процесс представлен в виде структуры, включающей: вход, условие запуска, преобразование, средства преобразования, выход. В МППР обычно происходит уменьшение объема входа и увеличение объема выхода. В момент выполнения условия запуска уменьшается входной ресурс и захватываются средства. В момент окончания преобразования происходит увеличение выходного ресурса и освобождение средств.

Операции МППР Op_k соответствует следующая структура:

$$Op_k = \langle f, in, out, u, res_{Lock}, res_{UnLock}, ch_{Op}, g_{Op}, c_a, mech, Status_{Op}, time, prior, kind_prior, break_off \rangle, \quad (1)$$

где f – функция, реализуемая операцией;

$in = \{in_1, \dots, in_n\}$ – множество входов (ресурсов, потребляемых операцией), различных типов;

$out = \{out_1, \dots, out_m\}$ – множество выходов (ресурсов, формируемых операцией), $out = f(in)$;

$u = \{u_1, \dots, u_z\}$ – множество команд управления;

$res_{Lock} = \{res_{Lock}^1, \dots, res_{Lock}^z\}$ – множество ресурсов, необходимых для прерывания операции, $res_{UnLock} = \{res_{UnLock}^1, \dots, res_{UnLock}^w\}$ – множество ресурсов, необходимых для продолжения выполнения операции,

$ch_{Op} = \{ch_{Op}^1, \dots, ch_{Op}^k\}$ – характеристики операции;

g_{Op} – цели операции (требуемые значения характеристик операции), $g_{Op} \subseteq ch_{Op}$;

c_a – условие запуска операции;

$mech = \{mech_1, \dots, mech_q\}$ – средства преобразования;

$Status_{Op} = \{wait, active, lock, done\}$ – состояние операции, определенное на конечном множестве состояний: *wait* – ожидание, *active* – выполнение, *lock* – прерывание, *done* – выполнена;

$time$ – длительность выполнения преобразования;

$prior$ – приоритет операции задает очередность выполнения операций, может быть описан постоянной величиной или функцией, т.е. быть статическим или динамическим;

$kind_prior$ – тип приоритета (относительный, абсолютный);

$break_off = \{true, false\}$ – признак запрета прерывания; если «*true*» – правило не может прерываться.

Для построения ядра моделирующей системы был использован аппарат продукционных систем [16]. Определим структуру продукционной системы модели МППР:

$$PS = \langle Rps, Bps, Ips \rangle, \quad (2)$$

где $Rps = \{RES(t)\} \cup \{MECH(t)\} \cup \{Order(t)\} \cup \{Sig(t)\} \cup \{Message(t)\} \cup \{U(t)\} \cup \{G(t)\}$ – текущее состояние ресурсов, средств, заявок, сигналов, сообщений, команд управления, целей (рабочая память);

Bps – база знаний (БЗ), состоящая из множества правил преобразования ресурсов (Op) и правил агентов;

Ips – машина вывода, состоящая из планировщика и машины логического вывода по БЗ агентов).

Интерпретатор может быть представлен кортежем:

$$Ips = \langle V_ips, S_ips, K_ips, W_ips \rangle,$$

где V_ips – процесс выбора из Bps и из Rps подмножества активных правил Bps_v и активных данных Rps_v , которые будут использоваться в очередном цикле интерпретатора;

S_ips – процесс сопоставления правил с данными;

K_ips – процесс разрешения конфликтов (или процесс планирования), определяющий, какое из сопоставлений будет выполняться;

W_ips – процесс, осуществляющий выполнение выбранного сопоставленного правила.

Результатом является модификация данных в *Rps*.

Задача оптимизации и совершенствования рассматриваемых процессов преобразования ресурсов связана с балансировкой ресурсов, разрешением конфликтов на средствах, формированием графиков протекания процессов, выявлением узких мест выполнения процессов и реинжинирингом процессов с целью устранения узких мест, а также решением задач планирования.

При разработке гибридной модели МППР была решена задача интеграции следующих аппаратов: имитационного, ситуационного и экспертного моделирования, агентного подхода. Гибридная модель МППР программно реализована в виде программного комплекса *VPsim* и автоматизированной системы выпуска металлургической продукции (АС ВМП).

При анализе различных процессов с помощью *VPsim* и АС ВМП, а также совместного анализа применения метода критического пути были разработаны следующие принципы создания моделей МППР:

- 1) классификация всех операций $\{Op\}$ по трём типам приоритетов (*prior*): а) высокий – для операций критического пути; б) средний – для операций, предшествующих операциям критического пути; в) низкий – для остальных операций;
- 2) применение моделей субподряда позволяет снять узкие места на средствах;
- 3) применение «выталкивающей» стратегии при моделировании проектных работ (FIFO) и алгоритмов балансировки средств. «Выталкивающая» стратегия применяется к особому типу ресурсов (заявкам (*Order*), аналог транзакта в *GPSS*).

Результаты балансировки модели МППР согласно данным принципам позволяют получать схожие результаты с методом критического пути (рисунок 1).

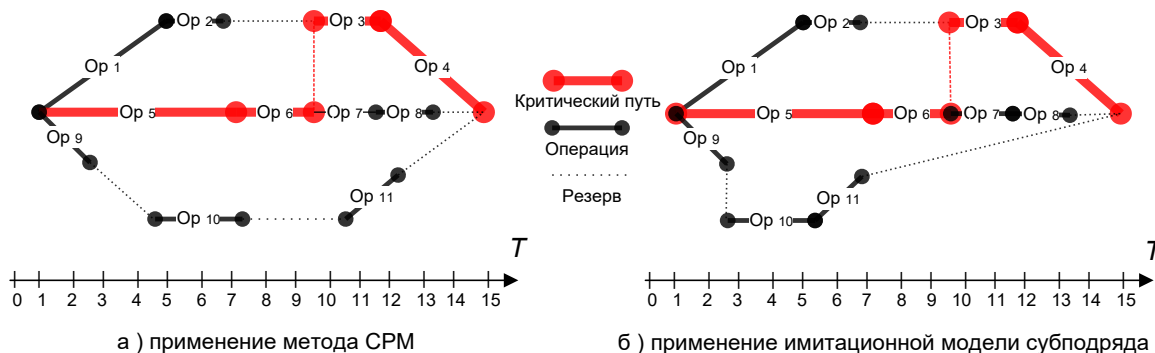


Рис. 1. Результаты балансировки методом критического пути и моделью МППР

Программный комплекс гибридного моделирования процессов преобразования ресурсов *VPsim*

Программный комплекс гибридного моделирования процессов преобразования ресурсов *VPsim* состоит из следующих продуктов: системы динамического моделирования ситуаций *VPsim.MAS*, системы поддержки принятия решений *VPsim.DSS* и CASE-средства *VPsim.SD* (Software Developer).

Система *VPsim.MAS* позволяет разрабатывать имитационную модель МППР, при разработке моделей агентов поддерживается разработка реактивных агентов и агентов с продукционной базой знаний. Система *VPsim.DSS* поддерживает проектирование концептуальной модели предметной области, описание фреймовой базы знаний и разработку машины вывода на фреймовой сети, разработку агентов с фреймовой базой знаний.

Опыт разработки программного комплекса *VPsim* позволил реализовать подсистему моделирования АС ВМП.

Структура системы АС ВМП

Система АС ВМП представляет собой web-ориентированную систему, предназначенную для слежения, контроля, моделирования, анализа и совершенствования процессов выпуска металлургической продукции [2, 8-9]. Система АС ВМП разработана АО «Ай-Тек» совместно с Уральским федеральным университетом.

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 (КИС). Подсистема моделирования включает в себя: модуль подготовки данных (ПД); модуль создания моделей процессов (СМП), поддерживающий описание моделей МППР; модуль оптимизации процессов предприятия (ОПП); модуль интеграции моделей (ИМ), который решает задачу использования моделей в процессах принятия решений в реальном масштабе времени. Схема взаимодействия модулей представлена на рисунк 2.

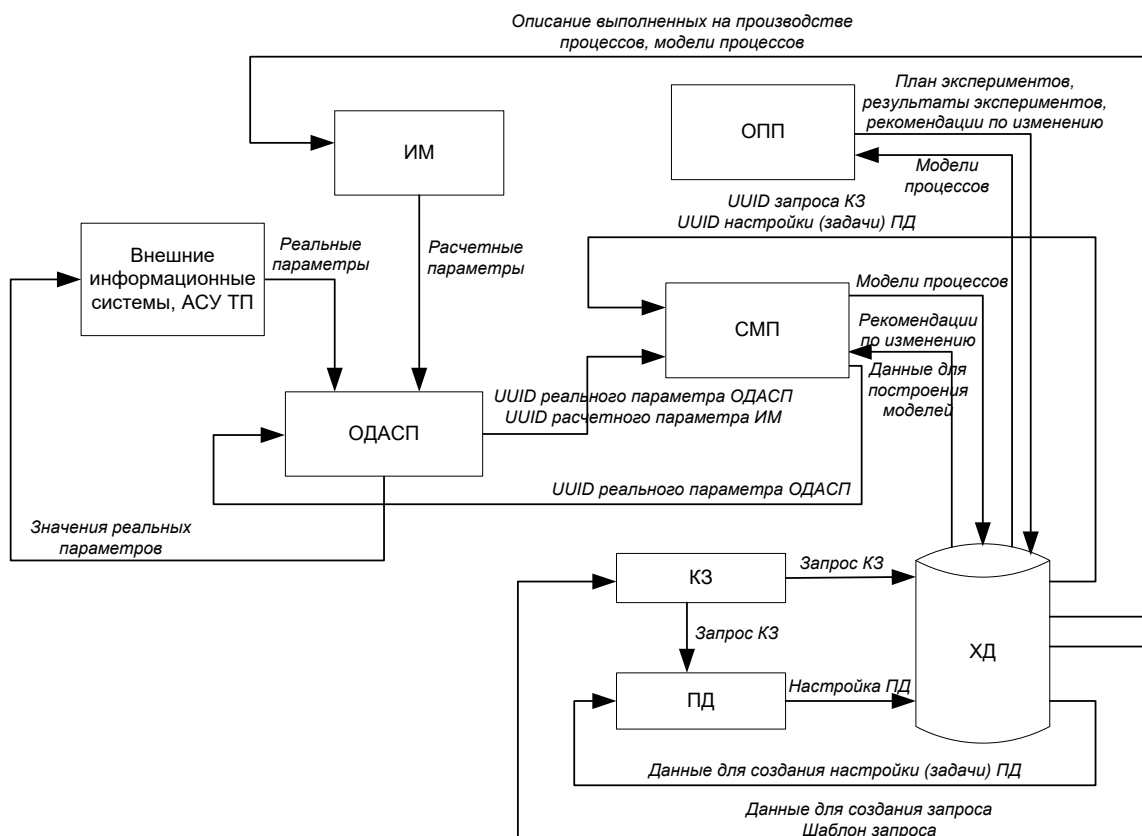


Рис. 2. Схема взаимодействия модулей системы АС ВМП

Особенностью взаимодействия модулей системы АС ВМП является то, что не только подсистема моделирования использует данные КИС посредством модулей ОДАСП (передает значения реальных производственных параметров), КЗ (передает результаты выполнения запросов на выборку из ХД), ПД (передает результаты выполнения задач, применяющих методы анализа данных к выборке ХД), но и параметры КИС меняются в зависимости от результатов моделирования посредством модуля ОДАСП.

Основными преимуществами подсистемы моделирования системы АС ВМП являются: 1) наличие в подсистеме модуля ПД, который с помощью методов машинного обучения осуществляет работу с большим объемом накопленных данных, в том числе, осуществляет восстановление пропущенных данных, собранных с производственных датчиков; 2) обмен данными (как входными данными для моделирования, так и результатами моделирования) с различными внешними информационными системами с помощью шины данных (модуля ОДАСП); 3) ориентация АС ВМП на непрограммирующего пользователя; 4) поддержка многопользовательского режима; 5) доступ к модели и проведение экспериментов через сеть Интернет; 6) метод анализа и устранения узких мест МППР, который рассмотрим ниже.

Метод анализа и устранения узких мест производственных процессов

Блок-схема метода анализа и устранения узких мест, реализованного в системе АС ВМП, представлена на рисунке 3. В основе метода анализа и устранения узких мест лежат следующие подходы: модель МППР, операционный анализ вероятностных сетей, метод критического пути и методы сетевого [10-13] и агентного планирования [1-3, 14-15].

Рассмотрим основные этапы метода, пронумеровав этапы в соответствии с блоками рис. 2.

1. Если модель МППР процесса предприятия была ранее построена в модуле СМП, то переходим на следующий этап.

2. С целью актуализации входных данных модели реальными данными о процессах предприятия в модуле ОПП необходимо обновить значения переменных модели путем взаимодействия с модулями КЗ и ИМ.

3. Данный блок описывает исходная модель МППР.

4. Составление плана экспериментов заключается в выборе таких входных (управляемых) параметров модели, значения которых оказывают наибольшее влияние на значения выходных (оцениваемых) параметров модели.

5. Имитационные эксперименты проводятся в модуле ОПП. Эксперименты проводятся согласно плану экспериментов до нахождения оптимального или эффективного решения.

6. Исходный план экспериментов.

7. При диагностике узких мест анализируются следующие параметры процесса МППР: коэффициент использования операции, средств, агента; среднее время заявки в очереди к операции, агенту; простой операции из-за отсутствия средств и/или входных ресурсов. Для оценки динамики работы операции и агента также анализируется средняя очередь заявок к операции, агенту, а также среднее состояние ресурсов и средств.

8. В результате проведения эксперимента формируется статистика выполнения операций, функционирования агентов, расходования и формирования ресурсов и заявок, и использования средств в операциях процесса МППР. По результатам анализа статистики экспериментов диагностируются узкие места, и принимается решение об изменении (свертке/развертке) процесса МППР. Изменение процесса МППР осуществляется следующими действиями: либо удалением операции, либо добавлением параллельной операции; добавлением/удалением (увеличением/уменьшением количества) средств, используемых операцией (операциями); увеличением/уменьшением количества ресурсов; добавлением или удалением правила агента, удалением агента. На данном этапе осуществляется выбор оптимального решения.

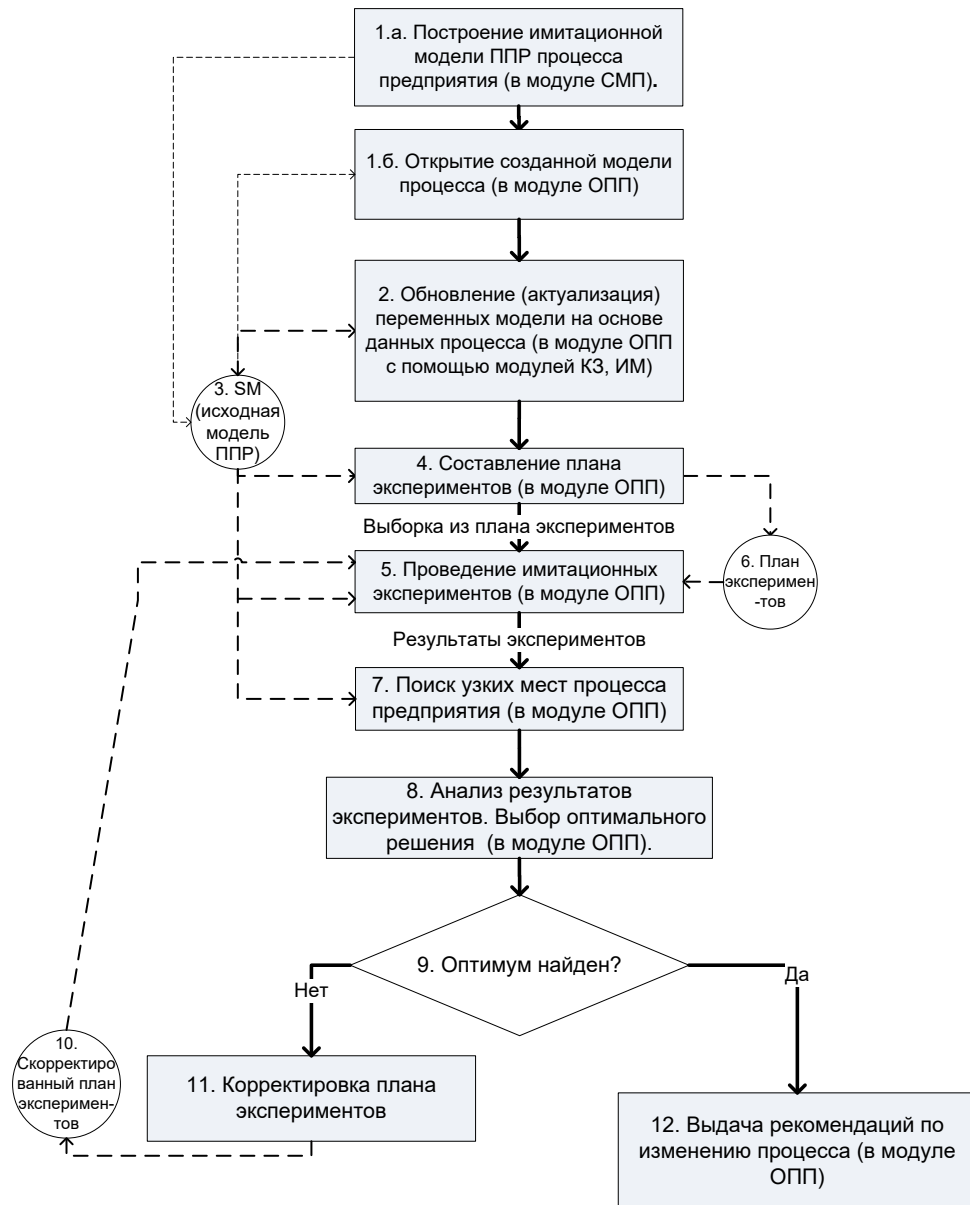


Рис. 3. Общая схема метода анализа и устранения узких мест процесса МППР

9. Если на предыдущем этапе было найдено оптимальное решение, то переходим на 12-й этап, иначе на 11-й (см. рисунок 3).

10. Скорректированный план экспериментов.

11. В случае если на этапе 9 не было найдено оптимальное решение, то осуществляется корректировка плана экспериментов и переход на этап 5.

12. В случае если на этапе 9 было найдено оптимальное решение, то осуществляется выдача рекомендаций по изменению процесса.

Метод анализа и устранения узких мест производственных процессов прошел апробацию на задаче балансировки ресурсов строительного предприятия China Wan Bao, а также на задачах анализа производства и логистики для металлургического производства.

Применение метода к задаче оптимизации логистики конвертерного цеха

Одним из направлений повышения эффективности металлургического производства является оптимизация подачи плавок на конвертеры с целью увеличения

количества плавков, разливаемых на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Для решения логической задачи перемещения стальной с металлом по агрегатам конвертерного цеха применено дискретно-событийное имитационное моделирование в АС ВМП.

Схема анализируемого конвертерного производства (КП) представлена на рисунке 4. Производство включает в себя три конвертера, три установки доводки металла (УДМ), три МНЛЗ, два крана (23 и 27), которые передвигаются по разным пролетам разных цехов, а также 6 сталевозов, передвигающихся по выделенным путям. При этом сталевозовы 71 и 611 имеют один путь для передвижения, равно как и сталевозовы 72 и 62, следовательно, возникает задача разрешения конфликтов данных сталевозов при передвижении.

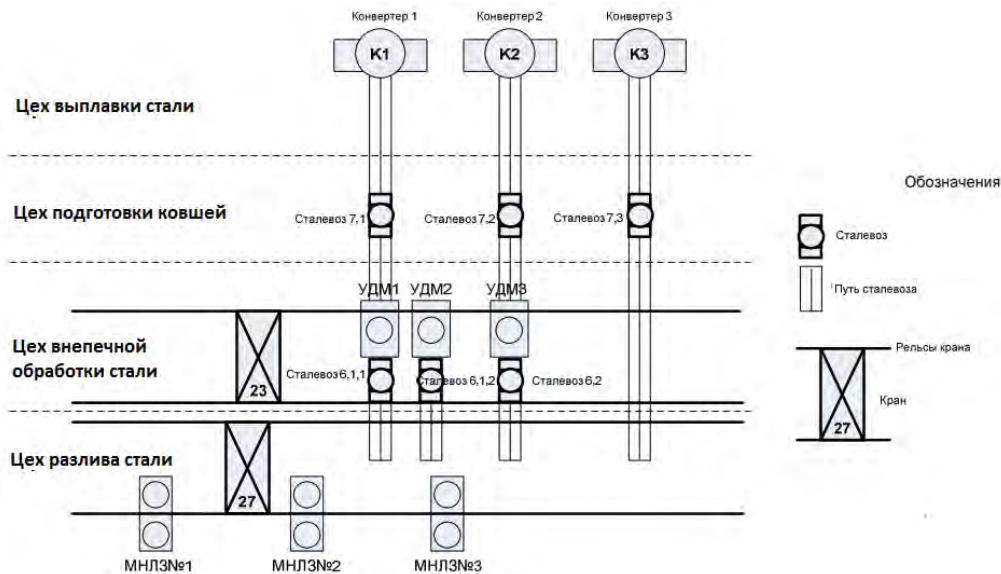


Рис. 4. Схема конвертерного производства

Основная задача при разработке имитационной модели работы конвертерного цеха (КЦ) в АС ВМП состоит в оценке различных вариантов подачи плавков на конвертеры с целью снижения максимального времени простоя стальной в ожидании разлива на МНЛЗ. Данное время не должно превышать 18 минут вследствие остывания стали в стальной и необходимости повторного разогрева ковша со сталью.

Согласно нотации МППР в модели представлены узлы-операции и узлы агенты. Описание взаимодействия кранов и сталевозов цеха реализовано в модели с помощью агентов. Агенты имеют базу знаний, описываемую с помощью продукционных правил вида «Если-То», правила строятся на ресурсах модели. На рисунке 5 приведен перечень продукционных правил базы знаний агента «Оператор крана 23», реализующего работу крана 23. Каждое правило описывается действиями «Если» и «Тогда».

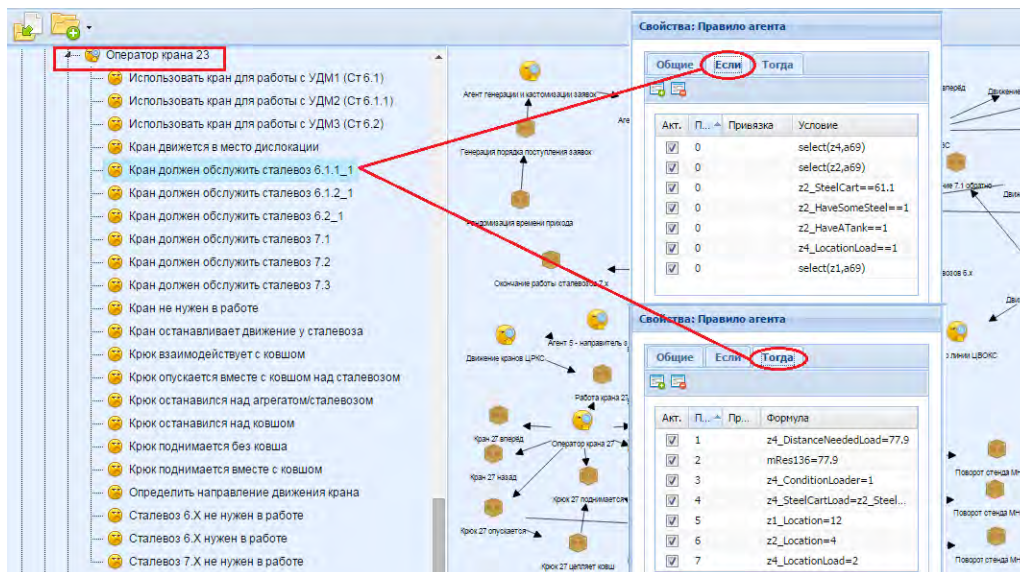


Рис. 5. Схема конвертерного производства

С построенной моделью были проведены эксперименты в модуле оптимизации процессов предприятия системы АС ВМП. Оценивалось время работы КЦ течение 200 минут. В таблице 1 представлены результаты проведения 10 экспериментов. В зависимости от интервала подачи плавков на конвертеры оценивались такие выходные характеристики, как: загрузка конвертеров в процентах (необходимо повышать), максимальное время простоя стальной ковша перед любой из МНЛЗ (должно быть менее 18 минут) и максимальное время простоя самого агрегата МНЛЗ (необходимо снижать).

Таблица 1. Результаты применения метода анализа и устранения узких мест к задаче оптимизации логистики конвертерного цеха

№	Интервал подачи плавков на конвертеры, мин	Выходные параметры				
		Загрузка конвертеров в процентах			Максимальное время простоя стальной ковша перед МНЛЗ, мин	Максимальное время простоя МНЛЗ, мин
		К1 %	К2 %	К3 %		
1	5	97,7	95,07	92,58	19,41	1
2	8	97,7	93,81	90,21	19,25	1
3	11	97,7	92,58	87,97	18,91	1
4	14	97,7	91,38	85,83	18,41	1
5	17	97,7	90,21	83,79	17,91	1
6	20	86,89	80	74,13	17,33	1
7	23	78,23	71,86	66,46	8,25	18,25
8	26	97,85	90,34	0	0,75	26
9	29	89,58	82,6	0	0,75	30,33
10	32	82,6	76,08	0	0	43

Анализ таблицы показал, что лучший результат достигается в эксперименте №6.

Выводы

В ходе исследования процессов преобразования ресурсов разработан метод анализа и устранения узких мест, обеспечивающий разрешение конфликтов,

возникающих при использовании процессами общих ограниченных ресурсов и средств. Метод программно реализован в программном комплексе VPsim и АС ВМП. В основе метода анализа и устранения узких мест используется операционный анализ вероятностных сетей и метод критического пути.

Подсистема моделирования АС ВМП поддерживает разработку имитационных моделей в нотации МППР, обмен информацией между моделью и разнородными информационными системами предприятия, выполнение модели, в том числе в режиме реального времени, и проведение оптимизационных экспериментов.

Разработанная в системе АС ВМП имитационная модель движения плавки в КЦ позволила описать различные технологические маршруты прохождения плавки по цеху с помощью агентов и оценить интервал подачи плавки на конвертеры цеха. По результатам проведения экспериментов было найдено оптимальное значение параметра «Отложенная подача плавки на конвертеры», которое составило 20 минут. Данный интервал обеспечивает непрерывность работы МНЛЗ и допустимое время простоя сталковшей перед разливкой на МНЛЗ.

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

Благодарности

Работа выполнена при поддержке постановления 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00183.

Литература

1. **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).
2. **Аксенов К.А., Антонова А.С.** Применение автоматизированной системы выпуска металлургической продукции для анализа логистических процессов // Девятая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019), 16-18 октября, Екатеринбург, УрФУ, С. 58-69.
3. **Antonova A., Aksyonov K., Ziomkovskaya P.** Development of a Method and a Software for Decision-Making, System Modeling and Planning of Business Processes. // Frontiers in Software Engineering. ICFSE 2021. Communications in Computer and Information Science. – Vol 1523. – Springer, Cham., 2021, DOI: 10.1007/978-3-030-93135-3_10. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-93135-3_10 (дата обращения 27.07.2022).
4. **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.
5. **Андрейчиков А.В.** Интеллектуальные информационные системы: учебник / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 424 с.
6. **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. – Jan. 2003. – Vol. 1. – Pp. 177-185.

7. **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.
8. **Ponomareva O., Porshnev S., Borodin A. & Mirvoda S.** Date 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)
9. **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).
10. **Clark C.E.** The PERT model for distribution of an activity time // Oper. Res. – 1962. – V. 10. – Pp. 405–406. doi:10.1287/opre.10.3.405.
11. **Kannan R.** Graphical evaluation and review technique (GERT): The panorama in the computation and visualization of network-based project management // Adv. Secur. Comput. Internet Serv. – Appl. 2014. – V.9. – Pp. 165–179. doi: 10.4018/978-1-4666-4940-8.ch009.
12. **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, AMiTaNS. – 2020. – Vol. 2302. [060013] (AIP Conference Proceedings; Vol. 2302). 2020. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0033584> (дата обращения 27.07.2022).
13. **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. – V. 29. – Pp. 31–42. doi: 10.2298/YJOR171115025G.
14. **Guizzi G., Vespoli S., Grassi A., Carmela Santillo L.** Simulation-based performance assessment of a new job-shop dispatching rule for the semi-heterarchical industry 4.0 architecture // In Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference (WSC) . – Orlando, USA, 2020. – Pp. 1664–1675. doi:10.1109/WSC48552.2020.9383981.
15. **Guizzi G., Revetria R., Vanacore G., Vespoli S.** On the open job-shop scheduling problem: a decentralized multi-agent approach for the manufacturing system performance optimization // In Proceedings of the 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. – Gulf of Naples, Italy, 2018. – Pp. 192–197. doi:10.1016/j.procir.2019.02.045.
16. 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.