

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВЫПУСКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

К.А. Аксенов, А.С. Антонова (Екатеринбург)

Введение

В настоящее время в металлургическом комплексе наблюдается высокая степень конкуренции. Одним из условий обеспечения конкурентоспособности предприятия на металлургическом рынке является поддержание качества выпускаемой продукции, которое напрямую зависит от своевременного, квалифицированного и ресурсоемкого выполнения протекающих на предприятии технологических, логистических и организационных процессов.

Одной из важнейших задач металлургических предприятий по эффективному управлению производством является выстраивание четко отлаженной системы логистики. Значимость логистических задач, например, для снижения себестоимости продукции обосновывается следующими результатами исследований [1]: при увеличении объемов производства на 20–30 % в год наблюдается непропорциональный рост затрат, связанных с логистикой, – на 40–60 % за тот же период. При этом повышение эффективности логистики организации производства может снизить издержки на внутризаводские перемещения на 30%. Среди функциональных разделов логистического управления на металлургическом производстве выделяют следующие области контроля: логистика запасов, транспортная логистика, закупочная логистика, сбытовая (распределительная) логистика, логистика производственных процессов, логистика складирования и информационная логистика. Производственная логистика является ключевой логистической функциональной областью на металлургическом предприятии, поскольку именно темпы и объемы производства являются точкой отсчета при определении графика и объемов как внутризаводских, так и внешних перевозок.

В данной работе будем рассматривать решение задач управления производственной логистикой с помощью интеграции методов анализа данных и имитационного моделирования, реализованных в системе выпуска металлургической продукции АС ВМП. Система АС ВМП представляет собой систему слежения, контроля, моделирования, анализа и оптимизации полного цикла выпуска металлургической продукции на основе создания и интеграции моделей технологических, логистических и бизнес-процессов предприятия. Система АС ВМП разработана АО "Ай-Теко" совместно с Уральским федеральным университетом.

Формализация внутризаводских логистических процессов моделью процессов преобразования ресурсов

Основным объектом управления производственной логистики являются сквозные материальные потоки. Под материальным потоком понимают совокупность сырья, материалов и полуфабрикатов, которые поступают в производственные подразделения и преобразуются там в готовые единицы продукции (ЕП). К материальным потокам относят [2]:

грузопотоки массовых и тяжелых грузов (железная и марганцевая руда, агломерат, металлический лом, известняк, уголь, огнеупоры, слитки, прокат);

потоки специфических грузов (топливо, жидкие металлы и шлак, горячие слитки, агломерат);

грузопотоки материально-технических ресурсов для целей ремонта (капитального или текущего) и строительства.

Каждый материальный поток сопровождают информационный и финансовый потоки, причем не всегда информационный или финансовый поток совпадает по времени с материальным.

Предметом логистического управления выступает оптимизация логистических потоков на основе синхронизации их взаимодействия. Цели производственной логистики заключаются в точной синхронизации процесса производства и логистических операций во взаимосвязанных подразделениях, снижении затрат и повышении качества продукции в процессе преобразования материального потока в технологических процессах производства готовой продукции.

Основные технологические материалопотоки массовых грузов металлургических предприятий образуются непосредственно в процессе производства. Это – расплавленный чугун и шлак доменных печей, расплавленная сталь и шлак сталеплавильных агрегатов, горячие слитки и др. Перевозочный процесс этих грузов устойчив по объему и адресности, но не имеет регламентированного времени начала и окончания грузовых операций, так как интервалы между выпусками продуктов плавки носят нерегулярный характер, а складские ёмкости для их промежуточного хранения отсутствуют. Поэтому транспортное обслуживание основных производств осуществляется по нормативным графикам [3]. Для основных производств, в соответствии с технологическим режимом работы агрегатов, разрабатываются нормативы времени на производство грузовых и транспортных операций, определяется последовательность их выполнения и вводится оперативное управление процессом. При перевозках особо учитывается необходимость поддержания температурного режима чугуна, слитков и др.

Для конвертерного и прокатного производства характерны следующие особенности протекающих производственных процессов [4]:

Число параметров жизненного цикла ЕП при прохождении по всему технологическому процессу достигает 6...7 тыс. ед.

Информация по параметрам ЕП распределена по различным цехам, что делает работу по анализу процессов и выявлению причин инцидентов чрезвычайно трудоемкой.

Для автоматизации различных задач используются разнородные и не связанные между собой информационные системы (АСУ ТП, MES, ERP), что препятствует адекватному анализу текущего состояния ЕП, агрегатов и транспортных средств.

Рассмотрим модель процесса преобразования ресурсов (ППР) в качестве инструмента формализации логистических процессов. Модель ППР разработана на основе следующих математических схем: сетей Петри, систем массового обслуживания и моделей системной динамики [5]. Основным объектом модели ППР является преобразователь ресурсов – непрерывная или дискретная операция преобразования входа (ресурсов, необходимых для выполнения процесса) в выход (продуктов – результатов выполнения процесса). Элемент (компонент) такого ППР 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.

Производственные объекты технологических, логистических и организационных процессов характеризуются сложностью структуры и алгоритмов поведения, многопараметричностью, что приводит к сложности их моделей. Сложные ППР, 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 ППР 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 ППР и взаимодействуют между собой. Существование агентов предполагает наличие сообщений (*Message*), микроситуаций (*Mis*), макроситуаций (*Mas*), ситуаций (*Sit*) и решений (планов действий) (*Decision*).

С процессом преобразования ресурсов соотносится логистический процесс перевозки, который захватывает на время выполнения средства (транспортные, производственные, персонал) и преобразует ресурсы (материальные, финансовые, информационные). В логистических задачах рассматриваются дискретные во времени процессы перевозок, которые запускаются событиями – приходом заявок на перевозки, что соответствует методам теории систем массового обслуживания. Модель ППР учитывает следующие особенности логистических процессов: иерархическую структуру, связанную с делением внутривозовских перевозок на межцеховые и

далее на межагрегатные, различные приоритеты перевозок в зависимости от технологических маршрутов ЕП, экспертные знания о путях разрешения типовых транспортных проблем и конфликты, возникающие при нехватке транспортных средств для выполнения параллельных операций перевозок. В таблице 1 приведен перечень задач, решаемых с помощью модели ППР и детализированных для процессов внутризаводской логистики.

Таблица 1. Задачи, решаемые с помощью модели ППР и детализированные для процессов внутризаводской логистики

Задачи, решаемые с помощью модели ППР	Детализация задач для процессов внутризаводской логистики
Задача распределения работ по средствам	В качестве средств выступают: транспортные средства, производственные агрегаты, рабочая сила.
Задача балансировки ресурсов (равномерного распределения ресурсов по работам)	Рассматриваются ресурсы: материальные, транспортные, финансовые, информационные, документные.
Задача оптимального размещения узлов предприятия	Рассматриваются следующие узлы предприятия: склады, цеха, агрегаты.
Задача календарного планирования выполнения работ с учетом ограниченных ресурсов и средств	Рассматривается планирование следующих работ: управление запасами, осуществление межцеховых и внешних перевозок, ремонт оборудования.
Задача выявления «узких мест» в анализируемых процессах	Выявляются простои агрегатов или простои в движении ЕП.
Задача повышения эффективности взаимодействия подразделений с точки зрения потока ресурсов	Рассматриваются следующие подразделения: цеха, транспортные подразделения, отдел логистики.
Задача управления проектами	Рассматриваются следующие проекты: ремонт оборудования, реконфигурация узлов предприятия, закуп сырья, сбыт ЕП.
Задача реинжиниринга	Задача реинжиниринга конфигурации узлов предприятия.

Задача оптимизации рассматриваемых логистических процессов 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. Рассмотрим метод анализа и устранения узких мест производственных процессов, использующий формализацию исследуемых процессов с помощью модели ППР. Для описания метода рассмотрим структуру системы АС ВМП, реализующей данный метод.

Структура системы АС ВМП

Система АС ВМП представляет собой web-ориентированную систему, предназначенную для слежения, контроля, моделирования, анализа и совершенствования процессов выпуска металлургической продукции [4–8]. 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 ППР; 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 рис. 1.

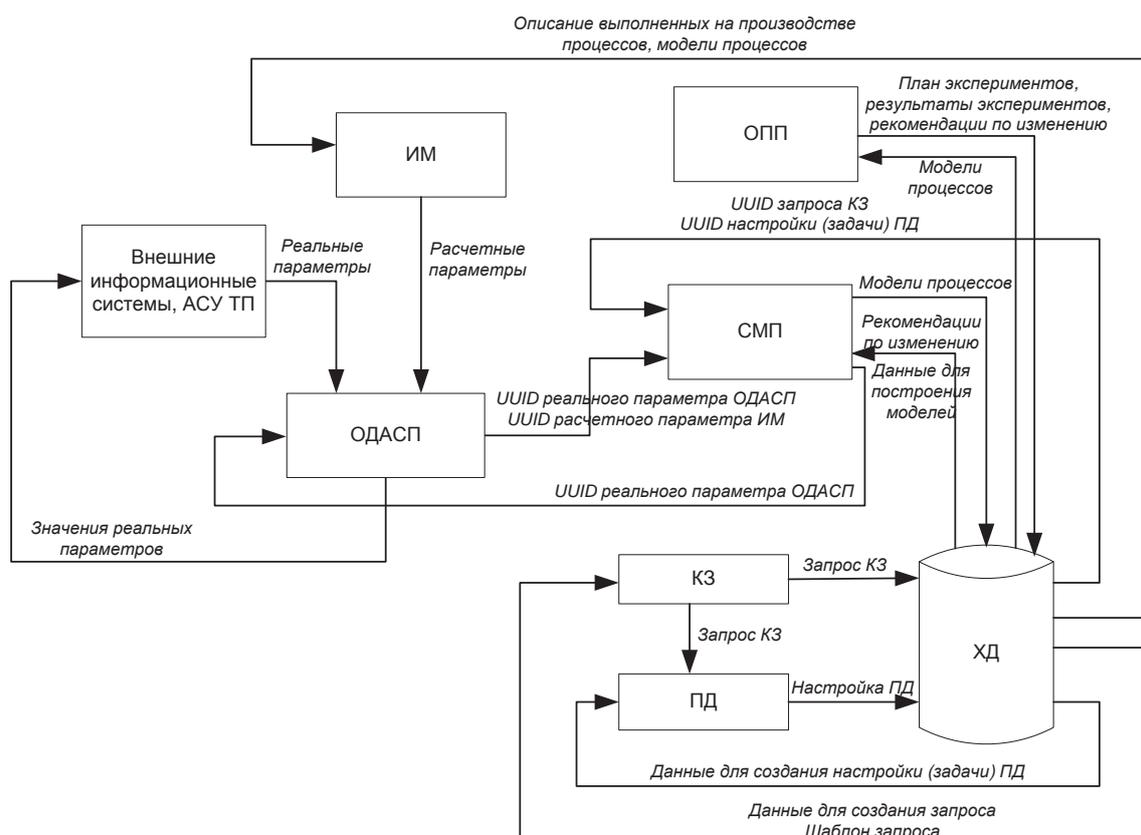


Рис. 1. Схема взаимодействия модулей системы AC ВМП

Особенностью взаимодействия модулей системы AC 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.

Коммерческие продукты класса систем имитационного моделирования технологических, логистических, организационных процессов, представленные на рынке (AnyLogic, Arena, ARIS, G2, Simio), являются Desktop-приложениями. При разработке сложных имитационных моделей в команде дополнительными требованиями к системам имитационного моделирования выступают следующие: поддержка многопользовательского режима, доступ к модели и проведение экспериментов через сеть Интернет.

Основным преимуществом подсистемы моделирования системы AC ВМП является 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. Кроме того, важным преимуществом системы AC ВМП является возможность осуществлять обмен данными (как входными данными для моделирования, так и результатами моделирования) с различными внешними информационными системами с помощью шины данных (модуля ОДАСП). К конкурентному преимуществу относится также ориентация системы AC ВМП на непрограммирующего пользователя, такого как технолог, логист и т.д. В системе AC ВМП реализован метод анализа и устранения узких мест процессов ППР.

Метод анализа и устранения узких мест производственных процессов

Блок-схема метода анализа и устранения узких мест, реализованного в системе AC ВМП, представлена на рисунке 2.

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

1. Если модель ППР 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. Это 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, средства, 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.

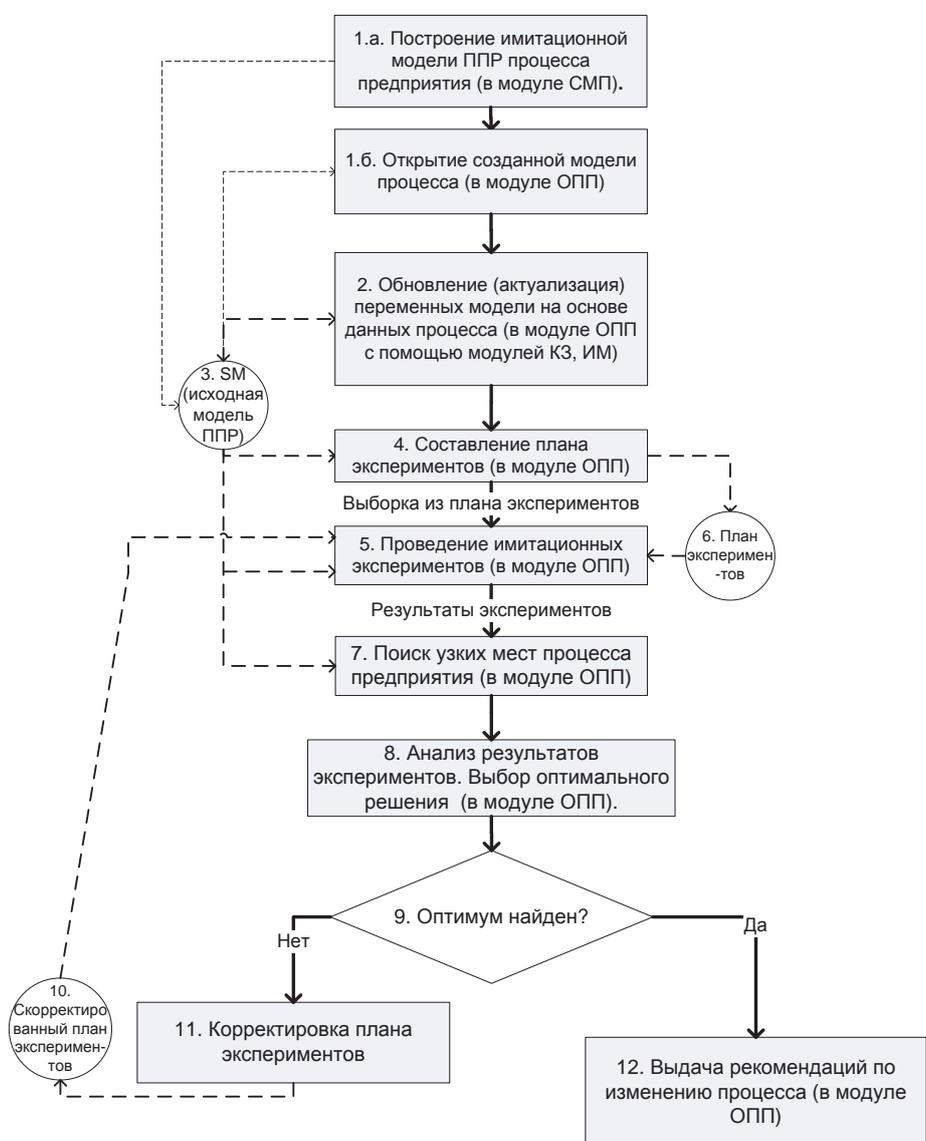


Рис. 2. Общая схема метода анализа и устранения узких мест процесса ППР

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.

9. Если на предыдущем этапе было найдено оптимальное решение, то переходим на 12-й этап, иначе на 11-й (см. рисунок 2).

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. Данный этап инициирует запуск ТБПИ по совершенствованию производственного процесса с целью устранения узких мест.

Метод анализа и устранения узких мест производственных процессов прошел апробацию на задаче балансировки ресурсов строительного предприятия China Wan Bao [9].

Помимо описанного выше метода система АС ВМП поддерживает также проведение оптимизации процессов предприятия (в модуле ОПП), которая заключается в генерации и оценке с помощью имитационного моделирования различных альтернатив функционирования исследуемых процессов и выбор одной альтернативы на основании описанного критерия (целевой функции). Интеграция эволюционного и имитационного моделирования позволяет сузить пространство полнофакторного эксперимента с моделью и получить оптимальное (эффективное) решение за меньшее время. Рассмотрим гибридный эволюционно-имитационный метод принятия решения, реализованный в системе АС ВМП с целью поддержки оптимизации процессов ППР.

Эволюционно-имитационный метод оптимизации производственных процессов

Система АС ВМП предоставляет возможность построения моделей ППР в модуле СМП. Модель ППР расширена применением генетического алгоритма (ГА) [10], одного из методов эволюционного моделирования. Данная возможность предоставляет инструмент для решения большого класса задач оптимизации.

Применение интегрированного эволюционно-имитационного алгоритма позволяет использовать естественные законы развития сложных систем для решения оптимизационных задач с помощью генерации и оценки альтернативных вариантов функционирования изучаемых процессов. За основу алгоритма взята схема интеграции ГА и СИМ, предложенная Курейчиков В.М. и его коллегами [11–12], а также в зарубежной литературе [13–16]. Предложенный алгоритм [17] отличается от существующих схем модификацией ГА с целью повышения качества найденного решения задачи оптимизации моделируемых процессов. Генетический алгоритм модифицирован алгоритмом имитации отжига [18] и алгоритмом поиска новизны [19]. В алгоритме поиска новизны мерой приспособленности альтернативного решения к условиям среды является оригинальность решения, которая определяется с помощью численных преобразований матрицы расстояний Хемминга между хромосомами-решениями. Оригинальность решений и их функции пригодности (значения целевых функций на выходе модели) определяют различные стратегии формирования новой популяции решений (нового пространства поиска). Алгоритм имитации отжига предназначен для реализации комбинации предложенных стратегий формирования новых популяций. Данный алгоритм основан на аналогии с процессом отжига металла, в результате которого у металла появляются новые свойства.

Формирование новой популяции происходит путем повторения процесса скрещивания двух случайно выбранных хромосом текущей популяции. Выбор осуществляется согласно вероятностям выбора первой P_i и второй P_j хромосом:

$$P_i = \frac{1}{N} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right) \right) + p_i^{MSS} \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right), \quad (1)$$

$$P_j = p_{ij}^{OSS} \left(1 - \exp \left(-\frac{1}{t_z} \right) \right) + p_j^{MSS} \exp \left(-\frac{1}{t_z} \right). \quad (2)$$

Здесь N – число хромосом в популяции; Z – текущий номер популяции; t_z – параметр алгоритма имитации отжига (его расчет см. на рис. 1); p_i^{MSS} и p_j^{MSS} – вероятности выбора хромосом i и j соответственно, которые пропорциональны значению функции пригодности хромосом; p_{ij}^{OSS} – вероятность выбора хромосом i и j вместе, которая пропорциональна весу расстоянию Хемминга между хромосомами. Расстояние Хемминга h_{ij} представляет собой число позиций в хромосомах, в которых гены хромосом отличаются. Вес расстояния Хемминга w_{ij} рассчитывается по формуле [12]:

$$w_{ij} = \frac{R-1}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{h_{ij}} + 1 \quad (3)$$

Здесь R – максимальный вес хромосомы в паре, L – длина хромосомы.

В ходе работы гибридного метода, с ростом числа сформированных поколений Z увеличивается параметр t_z , что приводит к смене стратегий выбора родителей для получения новых решений. В начале поиска решения при малых значениях Z преобладает выбор наиболее отличных друг от друга решений, одно из которых оценивается высокой функцией пригодности. Этим обеспечивается поиск новых решений «в ширину» путем различных комбинаций существующих. В дальнейшем стратегия сменяется на выбор обоих родителей, функции пригодности которых высоки. Так обеспечивается сохранение и улучшение найденных решений путем поиска «в глубину» решений с хорошим результатом.

Разработка и обоснование адекватности модели внутрипроизводственной логистики конвертерного цеха в системе АС ВМП

В металлургическом производстве эффективность работы цеха определяется не только объемом производимой продукции в единицу времени, но также качеством продукции, затратами ресурсов и объемом вредных выбросов в атмосферу. Непосредственное влияние на две последние характеристики оказывают внутрицеховая логистика и планирование передвижения продукции по переделам. Так, в кислородно-конвертерном цехе (ККЦ) остановка машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) вследствие неверно организованной подачи плавок в цех ведет к необходимости повторного запуска МНЛЗ с разогревом ёмкости для приема разливаемой стали – промышленного ковша (промковша). Разогрев промковша осуществляется до двух часов с использованием природного газа, который при горении выделяет в атмосферу вредные вещества. Важной задачей является анализ логистических операций ККЦ и выбор такой последовательности плавок на входе цеха, которая обеспечивала бы непрерывную работу МНЛЗ по разливу серии плавок.

Рассмотрим разработку модели работы ККЦ с помощью модуля СМП системы выпуска АС ВМП. Данные о процессах собраны с помощью датчиков АСУ ТП, расположенных в цехах ККЦ. Данные содержат информацию о передвижении единиц продукции по цехам выплавки стали (ЦВС), внепечной обработки стали (ЦВОКС) и разливки стали (ЦРКС). Конвертерный цех включает в себя следующие агрегаты: три конвертера, расположенные в цехе ЦВС, три установки доводки металла (УДМ), расположенные в цехе ЦВОКС, и три машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), расположенные в цехе ЦРКС. Движение плавки в сталеразливочном ковше (стальковше) между всеми цехами осуществляют три сталевоза, движение плавки между сталевозами в цехе ЦВОКС осуществляет один мостовой кран, движение плавки в цехе ЦРКС осуществляет также один мостовой кран.

Работу модели ККЦ условно можно разделить на работу шести блоков: 1) генерация заявок, включающий создание заявки и определение времени ее генерации; 2) работа конвертеров – операций подготовки, продувки, работы после продувки и слива стали; 3) работа сталевозов ЦВС и ЦВОКС – движение по линии, очередность работы и взаимодействие с кранами, создание и удаление заявки; 4) работа элементов УДМ – обработка исключений при возникновении новой плавки на линии сталевозов; 5) работа кранов ЦВОКС и ЦРКС – движение по линии, очередность работы и взаимодействие со сталевозами, создание и удаление заявки; 6) работа элементов

двухручьевого МНЛЗ – поворотного станда, промковша, двух кристаллизаторов, зон вторичного охлаждения и газорезок. На рисунке 3 приведен фрагмент структуры модели и часть "То (Then)" продукционного правила базы знаний агента «Сталевозы ЦВС».

Проведем исследование адекватности разработанной модели логистики конвертерного цеха. Адекватность будем оценивать с помощью критерия Стюдента путем проверки гипотезы о близости средних значений выходной характеристики модели «максимальное время простоя МНЛЗ (секунды)» известным статистическим значениям данной характеристики при протекании реальных процессов.

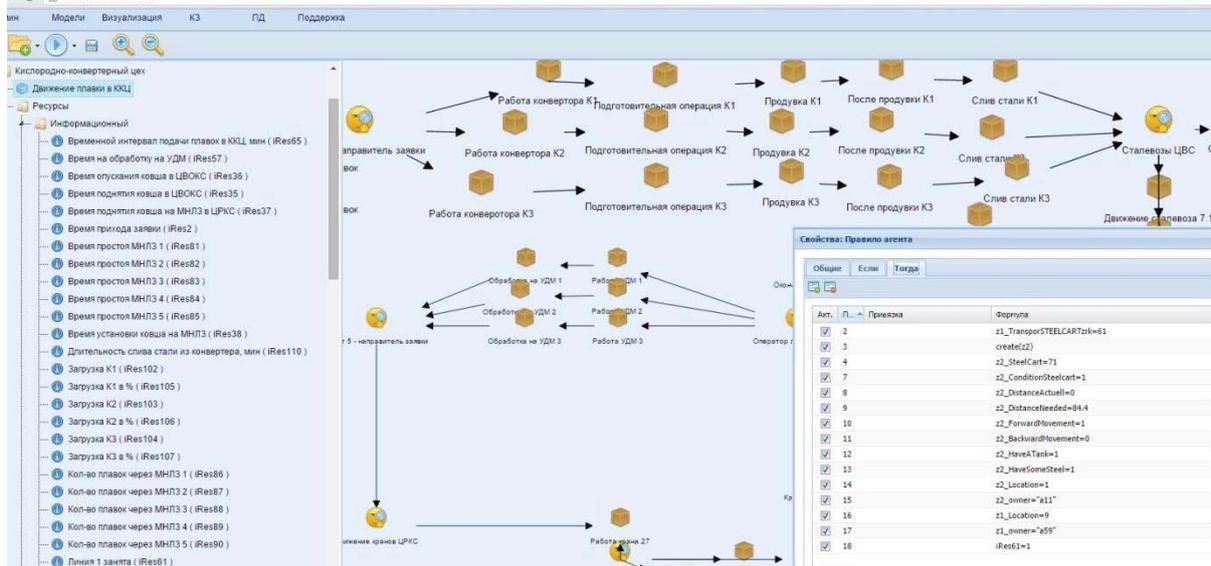


Рис. 3. Структура модели логистики конвертерного цеха в модуле СМП АС ВМП

Рассмотрим гипотезу H_0 о равенстве математических ожиданий двух выборок: выборки y_1 реальных статистических значений выходной характеристики с объемом выборки n_1 и выборки y_2 моделируемых значений данной характеристики с объемом выборки n_2 при неизвестных и неравных дисперсиях. При неравных объемах выборок $n_1 \neq n_2$ статистика критерия Стьюдента имеет вид [20]:

$$t = (\bar{y}_1 - \bar{y}_2) / \sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}, \quad (4)$$

где $\bar{y}_i = 1/n_i \cdot \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}$, $s_i^2 = 1/(n_i - 1) \cdot \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$, $i = 1, 2$.

Как показано в [16], при $n_1+n_2 > 200$ распределение Стьюдента практически не отличается от стандартного нормального закона, следовательно, при справедливости гипотезы H_0 статистика (4.1) подчиняется t_v -распределению Стьюдента с числом степеней свободы [20]:

$$v = (s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2)^2 / \left[\frac{(s_1^2/n_1)^2}{n_1-1} + \frac{(s_2^2/n_2)^2}{n_2-1} \right]. \quad (5)$$

Рассмотрим характеристику «максимальное время простоя МНЛЗ (секунды)» при значении интервалов последовательной подачи плавок на конвертеры 15 минут для каждого из конвертеров. Работу ККЦ будем анализировать в течение 1000 минут. Выборка y_1 реальных статистических значений данной характеристики с объемом $n_1=2$ имеет математическое ожидание $\bar{y}_1=101,5$ секунда и дисперсию $s_1^2=0,5$.

Проведем серию из 200 экспериментов в модуле ОПП с разработанной в модуле СМП моделью и сформируем выборку y_2 с объемом $n_2=200$, математическим ожиданием $\bar{y}_2=118,8$ секунд и дисперсией $s_2^2=2,2$. Рассчитаем значение статистики критерия Стьюдента $t = -2,123$ и число степеней свободы $v = 1,09$. Для рассчитанного числа степеней свободы и уровня значимости $\alpha=0,05$ табличное значение $t_v = 3,8$. Поскольку для рассматриваемой имитационной модели неравенство $|t| \leq t_v$ выполняется ($2,123 < 3,8$), следовательно, гипотеза H_0 о близости средних значений отклика «максимальное время простоя МНЛЗ (секунды)» разработанной модели и рассматриваемой системы принимается. Таким образом, по выбранной выходной характеристике «максимальное время простоя МНЛЗ (секунды)» модель логистики конвертерного цеха адекватна исследуемым процессам.

Применение эволюционно-имитационного метода к задаче оптимизации логистики конвертерного цеха

Целевой функцией задачи оптимизации логистики конвертерного цеха является минимизация максимального времени простоя МНЛЗ в ожидании стальной ванны. Необходимо определить интервал последовательной подачи плавок на конвертеры, обеспечивающий оптимизацию целевой функции.

Входными данными для разработанной модели логистических процессов являются как статистические данные о протекании реальных процессов, полученные непосредственно из ХД с помощью запросов модуля КЗ, так данные, формируемые в результате предварительной обработки данных ХД с помощью модуля ПД.

На рис. 4 представлен вид задачи ПД, реализующей расчет среднего времени процесса разливки плавки на МНЛЗ на основании накопленной и хранимой в ХД статистики выполнения данного процесса. Данная информация передается в модуль СМП для дальнейшего применения в ходе проведения экспериментов с разработанной моделью.

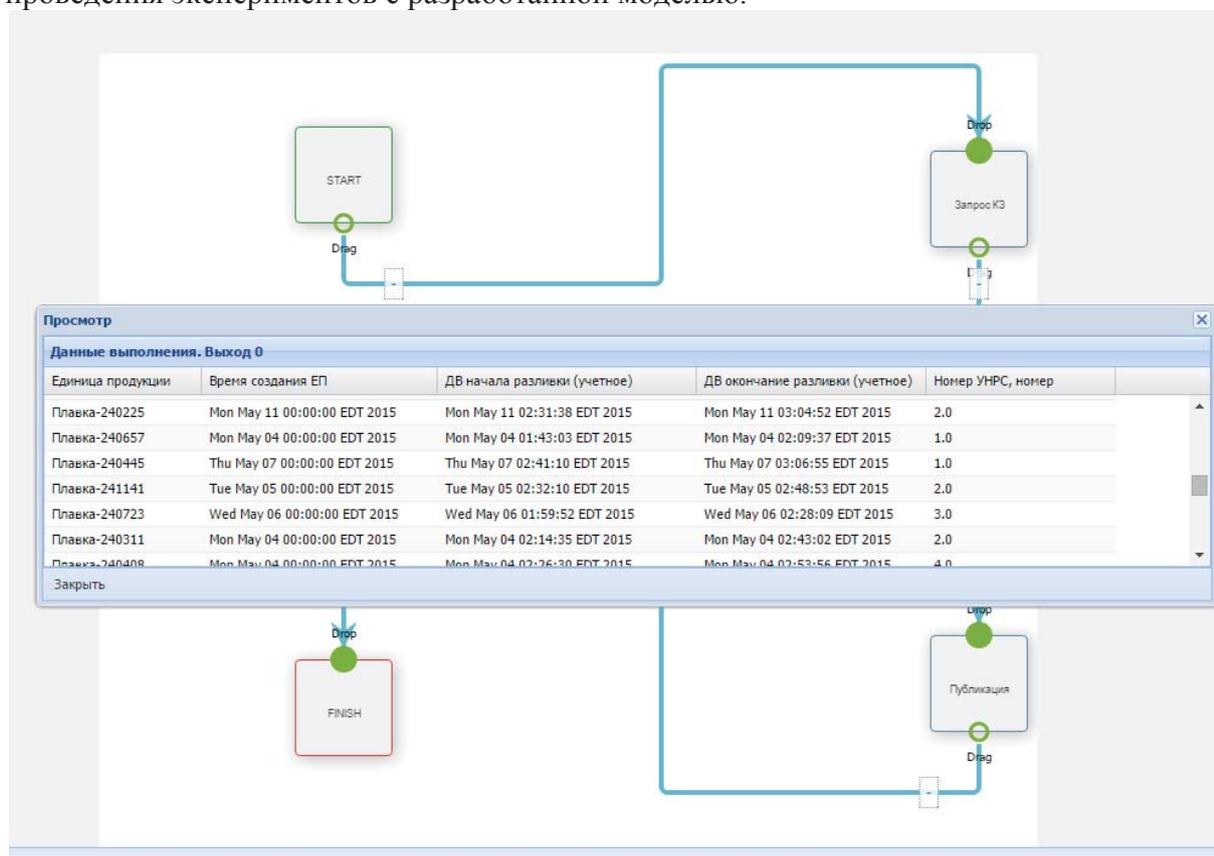


Рис. 4. Вид задачи ПД, реализующей расчет среднего времени разливки на МНЛЗ

В ходе применения эволюционно-имитационного метода к задаче оптимизации логистики конвертерного цеха управляемые параметры «интервалы подачи плавки на конвертеры» менялись для каждого из трех конвертеров в следующем диапазоне: от 10 до 25 минут.

В результате проведения эволюционно-имитационного эксперимента в модуле ОПП системы АС ВМП было сформировано 6 поколений хромосом, в каждом из которых присутствовало 10 хромосом-решений. Далее для каждого поколения были взяты решения с лучшим значением целевой функции (минимальным временем простоя МНЛЗ в секундах), приведенные в таблице 2.

Таблица 2. Результаты применения эволюционно-имитационного метода к задаче оптимизации логистики конвертерного цеха

Номер поколения	Входные параметры для решений с лучшим значением выходного параметра в поколении. Интервалы последовательной подачи плавков на конвертеры (минуты)			Выходной параметр Максимальное время простоя МНЛЗ (секунды)
	Конвертер 1	Конвертер 2	Конвертер 3	
1	25	22	25	660
2	20	19	21	450
3	20	18	19	180
4	12	22	18	219
5	21	17	16	73,5
6	17	17	16	11,8

Анализ таблицы 2 показывает, что лучший результат достигается в поколении №6 со значением максимального простоя МНЛЗ равным 12 секунд. Данный результат обеспечивается при задании следующих интервалов подачи плавков на конвертеры: на конвертер 1 через каждые 17 минут, на конвертер 2 через каждые 17 минут, на конвертер 3 через каждые 16 минут.

Выводы

В ходе исследования логистических процессов на металлургическом производстве проведена формализация процессов моделью процесса преобразования ресурсов. Для модели процесса 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 подсистеме моделирования автоматизированной системы выпуска металлургической продукции.

Подсистема моделирования автоматизированной системы выпуска металлургической продукции поддерживает разработку имитационных моделей в нотации процессов преобразования ресурсов, обмен информацией между моделью и корпоративными информационными системами, выполнение модели, в том числе в режиме реального времени, и проведение оптимизационных экспериментов с помощью разработанного гибридного эволюционно-имитационного метода. Данный метод основан на интеграции генетических алгоритмов и имитационного моделирования по схеме, предложенной Курейчиком В.М. и его коллегами, и расширен применением алгоритмов имитации отжига и поиска новизны.

В результате анализа логистических процессов кислородно-конвертерного цеха разработана имитационная модель работы цеха с помощью модуля создания моделей процессов предприятия автоматизированной системы выпуска металлургической продукции. Показана адекватность разработанной модели исследуемым логистическим процессам с помощью критерия Стьюдента.

Разработанная модель применена для решения задачи оптимизации логистических процессов цеха. В результате применения эволюционно-имитационного метода получены практические рекомендации, обеспечивающие максимальный простой машин непрерывного литья заготовок цеха, не превышающий 12 секунд, что является приемлемым технологическим значением. Непрерывность работы машин непрерывного литья заготовок исключает дополнительное использование природного газа для разогрева промковшей и снижает объем вредных выбросов в атмосферу.

Целью дальнейших исследований является применение автоматизированной системы выпуска металлургической продукции для решения практических задач анализа и оптимизации технологических, логистических и организационных процессов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00183.

Литература

1. **Портнов А., Ташбаев Ы.** Узкое место. Проблемы // Металлоснабжение и сбыт, 2007. № 2. С. 88–92.
2. **Цымбалюк О.В., Козенков Д.Е.** Логистическое управление предприятием в условиях неопределенности как инструмент минимизации технических рисков. Эл. ресурс, 2013. URL: <http://jurnal.org/articles/2013/ekon68.html>.
3. **Ларина Р.Р.** Логистика в управлении организационно-экономическими системами: монография. Донецк: ВИК, 2003.
4. **Аксенов К.А., Антонова А.С., Спицина И.А., Сысолетин Е.Г., Аксенова О.П.** Разработка автоматизированной системы анализа, моделирования и принятия решений для металлургического предприятия на основе мультиагентного подхода // Автоматизация в промышленности, 2014. № 7. Москва. С. 49–53.
5. **Аксенов К.А.** Модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов и системный анализ организационно-технических систем // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2009. № 6. С. 38–45.
6. **Aksyonov K., Vykov E., Aksyonova O., Goncharova N., Nevolina A.** Perspectives of modeling in metallurgical production (WIP) // Society for Modeling & Simulation International (SCS). Summer Simulation Multi-Conference (SummerSim'15). Chicago. USA, 2015. P. 341–344.
7. **Borodin A., Kiselev Y., Mirvoda S., and Porshnev S.** On design of domain-specific query language for the metallurgical industry // Proceedings of 11th Int. Conference BDAS 2015: Beyond Databases, Architectures and Structures: Communications in Computer and Information Science, 2015. Vol. 521. P. 505–515.
8. **Borodin A., Mirvoda S., Kulikov I., Porshnev S.** Optimization of memory operations in generalized search trees of PostgreSQL // Proceedings of International Conference: Beyond Databases, Architectures and Structures, 2017. P. 224–232.
9. **Aksyonov K.A., Vykov E.A., Smolij E.F., Aksyonova O.P., Wang Kai** Planning and bottleneck analysis of construction enterprise project portfolio // 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, MIM, 2013. P. 659–663.
10. **Goldberg D.** Genetic algorithms. Addison Wesley, 1989.
11. **Емельянов В.В., Курейчик В.М., Курейчик В.В.** Теория и практика эволюционного моделирования. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
12. **Зинченко Л.А., Курейчик В.М., Редько В.Г.** Бионические информационные системы и их практические применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011.
13. **Osaba E., Carballedo R., Diaz F.** Simulation tool based on a memetic algorithm to solve a real instance of a dynamic TSP // Proceedings of IASTED Int. Conf. Applied Simulation and Modelling, 2012. P. 27–33.
14. **Holland H.J.** Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
15. **Karova M., Petkova J., Smarkov V.** A genetic algorithm for project planning problem // Proceedings of Int. Scientific Conf. Computer Science, 2008. P. 647–651.
16. **Khebbache-Hadji S., Hani Y., Lahiani N., El Mhamedi A.** Simulation algorithm used in simulation model: application in a maintenance process // Proceedings of the 14th Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 2012. P. 1047–1052.
17. **Aksyonov K.A., Antonova A.S.** Multiagent genetic optimisation to solve the project scheduling problem under uncertainty // International Journal on Advances in Software, 2014. Vol. 7, no. 1&2. P. 1–19.

18. **Goffe W., Ferrier G., Rogers J.** Global optimization of statistical functions with simulated annealing // *Journal of Econometrics* 60, 1994. P. 65–99.
19. **Lehman J., Stanley K.** Exploiting open-endedness to solve problems through the search for novelty // *Proceedings of the Eleventh Intern. Conf. Artificial Life (ALIFE XI)*, Cambridge, MA, 2008. P. 329–336.
20. **Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Веретельникова И.В., Новикова А.Ю.** О применении критериев проверки однородности средних // *Вестник СибГУТИ. №1*. Новосибирск: СибГУТИ, 2018. с. 41–55.