

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ АКСУСКОГО ЗАВОДА ФЕРРОСПЛАВОВ

Д. И. Усанов

Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева,  
420111, Казань, Россия

УДК 004.942

Разработана имитационная модель оценки производственных мощностей Аксуского завода ферросплавов. Рассмотрены структура имитационной модели и средства автоматизации проведения имитационных исследований.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, металлургия, информационные технологии.

Article is devoted to development of simulation model for Aksu Ferroalloys Plant capacity evaluation. The article discusses simulation model structure and tools for researches automation.

**Key words:** simulation modeling, metallurgy, information technology.

**Введение.** Жесткая конкуренция вынуждает производственные предприятия активно применять информационные технологии для автоматизации производства, что дает возможность контролировать производственные процессы и повышать прибыль предприятия.

Используемые на предприятиях системы управления производством позволяют осуществлять контроль состояния и распределения ресурсов, диспетчеризацию производства, управление документами, сбор и хранение данных о технологических процессах. Однако указанных возможностей часто бывает недостаточно для принятия эффективных управленческих решений. Имеющиеся модели не способны учесть все возможные управляющие и возмущающие воздействия и смоделировать их последствия.

Одним из возможных способов решения рассматриваемых проблем является применение методов имитационного моделирования (ИМ). Использование имитационного моделирования позволит создать систему, способную оценить влияние управляющих и возмущающих воздействий на отдельные технологические операции и производственный процесс в целом. Имитационная модель оценки производственных мощностей Аксуского завода ферросплавов (Казахстан) предоставит возможность определить оптимальные параметры технологических схем, выявить и устранить “узкие места” в организации технологических и производственных процессов, спрогнозировать аварийные ситуации, оценить влияние ритмичности и объемов поставок на плановые производственные показатели, провести анализ загрузки производственных мощностей и оценить влияние ремонтно-восстановительных работ.

В данной работе представлено описание производственного процесса, рассматриваются принципы построения имитационной модели, структура шаблонов и основные алгоритмы. Также исследуется структура имитационного приложения (ИП) и программных средств автоматизации проведения имитационных исследований.

**1. Описание технологического процесса производства ферросплавов.** Аксуский завод ферросплавов — филиал АО «ТНК “Казхром”» — ведущее металлургическое предприятие, основным видом деятельности которого является производство массовых ферроспла-

вов, используемых для легирования сталей и сплавов и в других целях. Ферросплавы поставляются на предприятия металлургической и литейной промышленности, горно-добывающей отрасли. Объем выпускаемой продукции составляет свыше 900 тыс. т ферросплавов в физическом весе при проектной мощности 1 млн т.

Сырьевые материалы (хромовая руда Донского ГОК, марганцевый концентрат, кокс и др.) для производства ферросплавов, поставляемые на завод железнодорожным транспортом, выгружаются в приемные закрома (приямки) цехов подготовки шихты (ЦПШ) либо на специальные приемные площадки. После приемки и соответствующей переработки (дробление, рассев, усреднение) шихтовые материалы (ШМ) подаются конвейерами по трактам шихтоподачи в приемные бункеры дозирочных отделений соответствующих плавильных цехов (ПЦ). Смесь ШМ, подаваемая в печь, называется шихтой. Подаваемая в печи шихта измеряется колошами. Для каждой печи задается навеска, определяющая количество различных видов ШМ в одной колоше шихты. Подача ШМ из приемных бункеров ПЦ в печные карманы печей осуществляется дозирочными отделениями (ДО), в которых ШМ выбираются из приемных бункеров и смешиваются в соответствии с заданными для обслуживаемых печей навесками. Работа ДО зависит от заданного рецепта, определяющего конкретные приемные бункеры, из которых осуществляется выбор ШМ. Одно ДО может обслуживать одну и более плавильных печей, тогда как плавильная печь может обслуживаться только одним ДО.

Введем следующие обозначения:  $N_p$  — количество плавильных печей, задействованных в производственном процессе;  $N_c$  — количество ШМ различного вида;  $N_d$  — количество дозирочных, задействованных в производственном процессе;  $N_b$  — количество приемных бункеров на производстве. Тогда выражение

$$x_i^{sh} = \sum_{j=1}^{N_c} x_{i,j}^{sh}, \quad i = 1, \dots, N_p$$

задает колошу шихты для  $i$ -й печи. Здесь  $x_{i,j}^{sh}$  — количество ШМ  $j$ -го вида, подаваемого в  $i$ -ю печь в соответствии с навеской. Выражение

$$x_i^{r,z} = \sum_{k=1}^{N_b} \sum_{j=1}^{N_c} x_{i,j}^{r,z,k}, \quad i = 1, \dots, N_p, \quad z = 1, \dots, N_d$$

задает рецепт подачи шихты в  $i$ -ю печь  $z$ -м ДО. Здесь  $x_{i,j}^{r,z,k}$  — количество сырья  $j$ -го вида, выбираемого из  $k$ -го приемного бункера для подачи  $z$ -м ДО в  $i$ -ю плавильную печь.

Рецепт ДО должен обеспечивать заданные для печей навески:

$$x_{i,j}^{sh} = \sum_{k=1}^{N_b} x_{i,j}^{r,k}.$$

После дозирования шихта подается в электропечи, где происходит основной технологический процесс — выплавка ферросплавов. Процесс выплавки является энергоемким. Жидкий металл и шлак выпускаются из печей в специализированные ковши, из которых металл разливается в слитки на поддоны с помощью мостовых кранов или на конвейерных разливочных машинах. Далее металл поступает на склад готовой продукции (СГП).

По мере остывания слитки металла дробятся на щековых дробилках, и после рассева на необходимые классы крупности, проведения испытаний на соответствие установленным требованиям, упаковки (если требуется) и маркировки готовая продукция грузится в железнодорожные вагоны для отправки потребителям.

Остывший шлак подвергается сепарации в цехе переработки шлаков (ЦПШл) с целью извлечения металла, который также отгружается потребителю. Металлоконцентрат, перелый феррохром и хромовые оборотные отходы возвращаются в основное производство. Из шлака феррохрома изготавливается шлаковый щебень, используемый для дорожного строительства.

**2. Шаблоны имитационной модели.** В процессе основного производства ферросплавов можно выделить следующие этапы (технологические операции):

- прием, складирование, подготовка и подача ШМ;
- производство ферросплавов путем плавки шихты в электропечах;
- отгрузка готовой продукции.

Разработка имитационной модели осуществляется на основе предложенных в [1-4] подходов к созданию имитационных приложений. В соответствии с данными подходами модель формируется из шаблонов, представляющих собой сегменты этой модели, реализующие отдельные технологические операции.

*Шаблон генерации поставок сырья.* В данном шаблоне осуществляется генерация транзактов с информацией о поставках сырья (масса, марка и качество поставляемого сырья). Генерация транзактов осуществляется в соответствии с графиком поставок. Для каждого поставщика учитывается плотность распределения времени опоздания поставки.

*Шаблон приема вагонов.* Шаблон реализует задержку поступления сырья в приемные закрома ЦПШ на время выполнения всех необходимых действий, таких как визуальный осмотр, контроль массы вагонов, формирование сопроводительных документов, отбор и регистрация проб сырья, транспортировка вагонов к фронту разгрузки и пр.

*Шаблон выгрузки и складирования сырья.* В данном шаблоне принимается решение о месте выгрузки сырья и моделируется временная задержка на разгрузку. При принятии решения о выгрузке сырья определяется количество сырья, поставляемого в приемные закрома каждого ЦПШ.

*Шаблон генерации заявок на подачу ШМ в приемные бункеры ПЦ.* Заявки на подачу ШМ в приемные бункеры ПЦ генерируются с учетом остатков ШМ в приемных бункерах и интенсивности потребления сырья.

*Шаблон подготовки и подачи ШМ.* В данном шаблоне моделируется подача ШМ приемков ЦПШ в приемные бункеры ПЦ. Подача осуществляется по конвейерной системе ЦПШ.

*Шаблон дозирования ШМ и подачи шихты в печные карманы.* Шаблон имитирует расход ШМ из приемных бункеров ПЦ в соответствии с рецептами, заданными для печей.

*Шаблон плавки шихты в электропечи.* В данном шаблоне моделируется ожидание завершения плавки.

*Шаблон разлива металла и шлака и складирования металла на СГП.* Для каждой печи металл выливается в разливочную посуду или на разливочный конвейер. Далее выделяется и выбирается шлак, который подается в ЦПШл. Количество выдаваемого металла и шлака, а также время плавки определяются навеской и мощностью печи.

*Шаблон инициации заявок на дробление.* В шаблоне осуществляется анализ наличия металла на СГП и плана отгрузки. На основе этой информации формируются заявки на дроб-

ление металла. Для каждой заявки задается приоритет, который определяется на основе плана отгрузки с учетом срочности исполнения.

*Шаблон дробления и отсева металла.* В данном шаблоне моделируется работа дробильно-сортировочного комплекса.

*Шаблон складирования дробленого металла на СГП.* Шаблон моделирует размещение готовой к отгрузке продукции на СГП.

*Шаблон вывоза, переработки шлака и складирования переработанного шлака в приемных закромах ЦППШ.* В данном шаблоне моделируется временная задержка на перемещение и переработку шлака, реализуется алгоритм определения количества сырья, выделяемого из шлака, которое может быть возвращено в производство, а также моделируется подача переработанного шлака в приемные закрома ЦППШ.

*Шаблон инициации заявок на отгрузку.* В шаблоне анализируются план отгрузок и наличие готовой к отгрузке продукции на СГП. В случае наличия достаточного количества металла нужной фракции генерируется транзакт, имитирующий отгрузку готовой продукции.

*Шаблон отгрузки продукции.* В шаблоне моделируется процедура формирования партий готовой продукции для отгрузки конечным потребителям.

*Шаблон проведения планово-предупредительных работ (ППР).* В шаблоне анализируются графики ППР, заданные для всех единиц оборудования на производстве. В заданный момент времени единица оборудования переводится в неработоспособное состояние, длительность задержки равна продолжительности проведения работ, после чего оборудование вновь включается в производственный процесс. Также моделируются переходные процессы до начала и после завершения ППР.

*Шаблон вероятностного отказа оборудования.* В данном шаблоне для каждого агрегата задается вероятность выхода из строя, в соответствии с которой моделируются поломки.

*Шаблон специального отказа оборудования.* Шаблон моделирует отказ оборудования в заданный момент времени по требованию исследователя.

*Шаблон отказа оборудования по наработке.* В данном шаблоне моделируется выход оборудования из строя по наработке.

В соответствии с функциональным и организационным делением предприятия каждый из указанных шаблонов может быть использован в модели неоднократно с учетом индивидуальных особенностей и настроек.

**3. Принципы работы имитационной модели.** Имитационная модель разрабатывается на GPSS World. Информация обо всех объектах производства (конвейерах, грохотах, дробилках и пр.) хранится в матрицах GPSS. Данная информация включает большое количество параметров, таких как производительность оборудования, его текущее состояние и пр. Так, для промежуточных бункеров в матрицах GPSS задается информация об их максимальной вместительности и текущей наполненности. Для конвейеров в матрицах задаются длина, скорость движения, пропускная способность и доля потерь при подаче.

Для каждой поставки сырья в модели генерируется “транзакт-поставка”. В параметрах транзакта хранится информация о марке поставляемого сырья, его количестве и качестве. Транзакты генерируются в соответствии с планом поставки. При этом учитывается функция распределения времени опоздания поставок, которая определяет отклонения от планируемого времени генерации “транзакта-поставки”. Функция распределения времени опоздания формируется на основе истории работы с конкретным поставщиком и накопленной статистики опозданий или задается экспертным путем. “Транзакт-поставка” задерживается на время обработки сырья (взвешивание, забор и регистрация проб, выгрузка и пр.). За-

тем выполняется алгоритм распределения сырья между ЦПШ. Данный алгоритм определяет объем сырья, подаваемого в каждый ЦПШ, с учетом расхода сырья плавильными печами, обслуживаемыми указанными ЦПШ, остатков сырья в приемных бункерах и ППР.

Введем следующие обозначения:  $N_{\text{ЦПШ}}$  — число ЦПШ;  $M_i^k$  — число плавильных печей в  $k$ -м плавильном цехе, обслуживаемом  $i$ -м ЦПШ;  $K_i$  — количество плавильных цехов, обслуживаемых  $i$ -м ЦПШ;  $i = 1, \dots, N_{\text{ЦПШ}}$  — индекс рассматриваемого ЦПШ;  $j = 1, \dots, M_i^k$  — индекс плавильной печи  $k$ -го плавильного цеха  $i$ -го ЦПШ;  $k = 1, \dots, K_i$  — индекс плавильного цеха  $i$ -го ЦПШ;  $t_{ij}^k = t_{\text{сл}} - t_{\text{т}} - \text{ппр}t_{ij}^k$  — количество часов работы  $j$ -й печи  $k$ -го ПЦ  $i$ -го ЦПШ до следующей планируемой поставки сырья данного вида ( $t_{\text{сл}}$  — дата и время следующей поставки сырья данного вида;  $t_{\text{т}}$  — текущие дата и время;  $\text{ппр}t_{ij}^k$  — простои печи (время которых попадает во временной интервал с момента текущей поставки до момента следующей поставки или завершения моделирования), связанные с ППР, включая время переходных процессов;  $r_{ij}^k$  — расход сырья данного вида  $j$ -й плавильной печью  $k$ -го плавильного цеха  $i$ -го ЦПШ (т/ч);  $p_{ij}^k$  — расход сырья данного вида  $j$ -й плавильной печью  $k$ -го плавильного цеха  $i$ -го ЦПШ в переходные периоды, связанные с ППР, по всем ППР, попадающим во временной интервал с момента текущей поставки до момента следующей поставки или завершения моделирования (т);  $b_{ik}$  — остаток сырья данного вида в приемных бункерах  $k$ -го плавильного цеха, обслуживаемого  $i$ -м ЦПШ;  $s_i$  — остаток сырья данного вида в приемках  $i$ -го ЦПШ;  $v_i$  — объем приемков сырья данного вида в  $i$ -м ЦПШ;  $z_i$  — признак наполненности приемков под заданный вид сырья  $i$ -го ЦПШ ( $z_i = 1$  при  $v_i = s_i$ ;  $z_i = 0$  при  $v_i > s_i$ );

$Z$  — множество ЦПШ с наполненными приемками;  $h_i^* = \sum_{k=1}^{K_i} \left( \sum_{j=1}^{M_i^k} (r_{ij}^k t + p_{ij}^k) - b_{ik} \right)$  — потребность  $i$ -го ЦПШ в данном виде сырья до следующей поставки сырьевых материалов или до завершения моделирования без учета потерь сырья при подаче. Потребность рассчитывается в зависимости от расхода сырья данного вида каждым ЦПШ. На основе заданной навески и мощности печей, обслуживаемых ЦПШ плавильных цехов, определяется расход сырья данного вида в час для каждого ЦПШ. Таким образом рассчитывается расход сырья данного вида печами каждого ЦПШ. Зная время до следующей поставки или до завершения моделирования, можно рассчитать потребность каждого ЦПШ в сырье данного вида. При поставке сырья в ЦПШ существуют определенные потери, которые необходимо учитывать:  $l = [0; 1)$  — коэффициент потерь при подаче сырья в приемные бункеры ПЦ (общий коэффициент потерь при подаче рассчитывается на основе коэффициентов потерь, заданных для дробилок, грохотов и конвейеров на маршруте подачи);  $h_i = h_i^*/(1 - l)$  — потребность  $i$ -го ЦПШ в данном виде сырья до следующей поставки сырьевых материалов данного вида или до завершения моделирования с учетом коэффициента потерь при подаче  $l$ ;  $X$  — общее количество поставляемого сырья;  $x_i$  — количество сырья (т), поставляемого в  $i$ -й ЦПШ.

В соответствии с введенными обозначениями разработан следующий алгоритм распределения сырья между ЦПШ:

1. Рассчитываем  $z_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ). Формируем множество  $Z = \{z_i | z_i = 1\}$ .

2. Если  $Z = \emptyset$ , значит, все приемки всех ЦПШ заполнены, следовательно, остаток нераспределенного сырья  $X$  высыпается на открытые площадки. Конец алгоритма. Иначе переходим на шаг 3.

3. Поступившее сырье  $x_i = X h_i / \sum_{i=1}^N h_i \forall i : z_i = 0$  распределяется пропорционально потребности среди ЦПШ, приемки которых не заполнены с учетом потерь при подаче.

4. Если  $x_i + s_i > v_i$ , то  $x_i = v_i - s_i$ , т. е. если полученный объем сырья переполняет приемки, то уменьшаем его до максимально возможного.

5. Если  $X = X - \sum_{i=1}^N x_i$ ,  $s_i = s_i + x_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , то уменьшаем объем неразмещенного сырья и увеличиваем количество сырья в приемках.

6. Если  $X \neq 0$ , то переходим на шаг 1. Иначе конец алгоритма.

После распределения и выгрузки сырья в приемки ЦПШ “транзакт-поставка” уничтожается.

Для подачи сырья из приемков ЦПШ в приемные бункеры плавильных цехов в модели реализован специальный диспетчер, анализирующий наполненность бункеров, а также рецепты дозировок и навески и мощности плавильных печей, которые определяют интенсивность расхода сырья из приемных бункеров. Диспетчер генерирует транзакты, отвечающие за поставку сырья в приемные бункеры плавильных цехов. Данные транзакты анализируют состояние конвейерной системы ЦПШ и выбирают маршрут подачи. Для каждого ЦПШ задается множество маршрутов подачи сырьевых материалов различного вида с учетом того, что различные виды сырья нельзя смешивать. Маршруты задаются средствами удобного пользовательского интерфейса при формировании структуры производства. Транзакты, отвечающие за подачу, анализируют проведение ППР на маршрутах и выбирают оптимальный маршрут.

Каждое ДО, осуществляющее выбор ШМ из приемных бункеров, моделируется отдельным транзактом. В соответствии с выбранным уровнем абстракции транзакт, моделирующий работу ДО, в каждую единицу модельного времени осуществляет уменьшение наполненности приемных бункеров в соответствии с заданным рецептом и интенсивностью потребления ШМ, которая определяется навесками и мощностями обслуживаемых печей.

Работа печи моделируется специализированным транзактом, ожидающим момента выдачи металла. Время ожидания определяется мощностью печи. Когда наступает время выдачи металла, данный транзакт моделирует временную задержку на разлив металла, после чего увеличивает количество металла заданной марки на СГП. Каждый СГП представляется в модели GPSS в виде матрицы, в которой задаются марка металла и его наличие. После завершения этапа разлива металла генерируется транзакт, отвечающий за переработку шлака.

**4. Математическая модель плавильной печи.** Анализ изложенного выше представления производственного процесса позволяет сделать вывод о необходимости разработки математической модели печи для определения интенсивности потребления шихты, объема выпускаемого металла и шлака, а также для вычисления времени плавки на основе заданных навески и мощности.

Введем следующие обозначения:  $x_i^n$  — навеска  $i$ -й плавильной печи в рассматриваемый момент времени;  $x_i^w$  — мощность  $i$ -й плавильной печи в рассматриваемый момент времени;  $t_i$  — время плавки, по истечении которого желательное (но не обязательно) осуществлять выдачу металла, мин;  $Me_i$  — выдача металла при заданных навеске и мощности печи, т/мин;  $Sh_i$  — выдача шлака при заданных навеске и мощности печи, т/мин;  $R_i$  — расход шихты при заданных навеске и мощности печи, колош/мин.

В рамках данной математической модели необходимо получить зависимости, определяющие время плавки, выдачу металла и шлака, а также расход шихты при заданных навеске и мощности печи:

$$t_z = f_t(x_i^n, x_i^w), \quad Me_z = f_{Me}(x_i^n, x_i^w), \quad Sh_z = f_{Sh}(x_i^n, x_i^w), \quad R_z = f_R(x_i^n, x_i^w).$$

Физические процессы, протекающие в плавильной печи, математически не формализованы, поэтому печь рассматривается как черный ящик, и математическая модель строится с использованием двух статистических методов: 1) регрессионного анализа; 2) метода нейронных сетей.

Полученная математическая модель будет реализована в виде динамически подключаемой dll-библиотеки. GPSS World предоставляет специализированные PLUS-процедуры для загрузки dll-библиотек, вызова произвольных процедур и передачи параметров. В случае использования регрессионной модели в dll-библиотеке будут реализованы полученные выражения, а в случае применения метода нейронных сетей — полная структура обученной сети. Статистика, необходимая для построения математической модели, будет импортироваться из внешних источников данных или может быть задана экспертом.

**5. Индексы производительности.** Основой для проведения любого исследования является выделение показателей и характеристик функционирования системы, которые далее будем называть индексами производительности. Данные индексы можно разделить на две группы: первичные (элементарные) и производные. В рассматриваемом случае первичными индексами являются:

- коэффициенты загрузки оборудования, участков и цехов в целом (диапазон возможных значений этих коэффициентов  $0 \div 1$ ; чем выше загрузка, тем больше значение данного коэффициента);
- средние времена задержки на каждом этапе обработки;
- средние времена реализации как отдельных элементов технологического процесса, так и всего технологического процесса выпуска продукции;
- объем продукции, выпущенной участком, цехом, предприятием за период моделирования;
- количество израсходованного сырья каждого типа;
- расход электроэнергии.

Для оптимизации разрабатываемой имитационной модели помимо представленных первичных индексов производительности можно построить сколь угодно большое количество производных индексов. Эти индексы можно получить, объединив по некоторой формуле ряд первичных индексов.

**6. Подсистема динамического мониторинга модели.** Наряду с определением значений индексов производительности в момент завершения моделирования существенный интерес представляет изучение динамики их изменения в процессе моделирования. С этой целью разработан специальный программный компонент динамического мониторинга имитационных моделей на GPSS World [5]. С помощью средств GPSS World можно получить динамические характеристики модели, например, используя переменные или таблицы, вводя дополнительный сегмент с таймером и т. д. Однако это приводит к значительному уменьшению скорости работы модели; кроме того, в современных имитационных приложениях объем непосредственной работы пользователя с текстом модели обычно максимально уменьшен, а все операции с данными и алгоритмами выполняет программная оболочка, окружающая модель [1-4].

Любые характеристики любых объектов модели в GPSS World представляются системными числовыми атрибутами (СЧА) GPSS-объектов. Разработанная подсистема мониторинга модели (ПММ) позволяет исследователю выбрать перечень интересующих его СЧА объектов и интервал регистрации значений.

Для регистрации значений СЧА в модели осуществляется вызов PLUS-процедуры Call\_String, которая осуществляет передачу строки данных специальной dll-библиотеке. В передаваемой строке данных закодированы значения СЧА, модельное время и идентификаторы, позволяющие ПММ точно определить объект и параметр, значение которого было получено.

ПММ является универсальным программным компонентом, который может быть интегрирован в любую модель, написанную на языке GPSS World. Помимо алгоритма регистрации значений СЧА ПММ содержит набор графических средств для отображения результатов.

**7. Подсистема оптимизации.** Наряду с анализом первичных и производных индексов производительности и динамики их изменения для проведения эффективных исследований необходим механизм решения оптимизационных задач. В рамках модели производства ферросплавов можно выделить такие оптимизационные задачи, как максимизация объема выпускаемых ферросплавов, минимизация себестоимости продукции, минимизация расхода электроэнергии и пр.

Для решения оптимизационных задач разработан универсальный программный компонент, который, так же как и ПММ, может быть интегрирован в любую модель на языке GPSS World [6]. Исследователь может сформировать произвольную целевую функцию — выбрать оптимизируемый индекс производительности и задать набор факторов (например, мощность печи, навеску, производительность оборудования и пр.).

Для решения оптимизационных задач целесообразно использовать метамоделли [6-8]. Мета-модель задает целевую функцию и позволяет существенно уменьшить время, затрачиваемое на поиск экстремума, за счет уменьшения количества прогонов имитационной модели, для осуществления каждого из которых может потребоваться значительное время. Для построения метамоделли используются нейронные сети. Обучающая выборка, на основе которой происходит обучение нейронной сети, представляет собой совокупность значений целевой функции при заданных значениях факторов. Для формирования обучающей выборки, которая позволит достичь необходимой точности метамоделли при минимальных затратах, используется теория планирования экспериментов. С этой целью разработана подсистема планирования эксперимента (ППЭ) [6]. ППЭ формирует план эксперимента, представляющий собой наборы значений факторов, при которых будут осуществляться прогоны имитационной модели.

В качестве метода оптимизации выбран генетический алгоритм. Каждая “особь” представляет собой набор значений аргументов целевой функции, а значение функции приспособленности определяется соответствием значения целевой функции критерию оптимизации.

**8. Пользовательский интерфейс имитационного приложения.** Следует отметить, что при проведении имитационного исследования все действия должны выполняться по сценарию, понятному и интуитивно доступному специалистам предприятия. Программа, реализующая имитационную модель, создана профессионалами в моделировании и поэтому должна быть окружена дружественным интерфейсом [6]. Язык для диалога с имитационной моделью должен быть “языком диспетчеров и системных аналитиков”. Все множество языка диалога в имитационном приложении нужно разбить на два подмножества — язык ввода и корректировки исходных данных и язык анализа результатов моделирования.

В языке ввода вся терминология и последовательность ввода данных в комплексе должны соответствовать правилам, инструкциям и традициям, принятым в промышленном производстве.



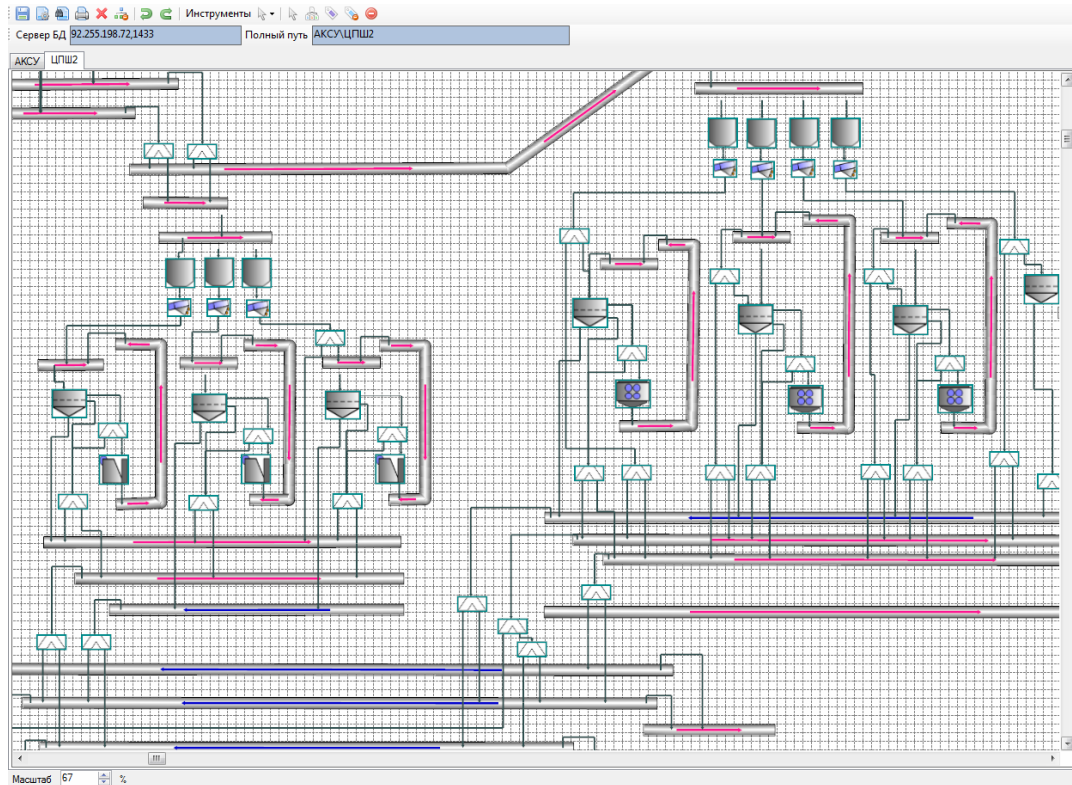


Рис. 1. Графический редактор производственных схем (цех подачи шихты)

В целом при работе с комплексом пользователь должен быть обеспечен следующими диалоговыми возможностями ввода и корректировки исходных данных:

- обеспечение удобного и интуитивно понятного ввода исходных данных для модели;
- обеспечение последовательного и регламентированного порядка ввода в соответствии с существующими в отрасли технологиями и инструкциями;
- обеспечение автоматического контроля значения введенных данных (на тип данных, числа и т. д.), обнаружения ошибок ввода, выдачи подсказок;
- обеспечение работы с данными смежных автоматизированных систем, эксплуатируемых в отрасли (например, возможность находить и конвертировать файлы статистики).

Задание схемы производства (расположение и связи между единицами оборудования, материальные потоки, характеристики оборудования) осуществляется средствами графического редактора (рис. 1).

Язык анализа результатов включает последовательность выводимых экранных изображений (окна, панели, закладки и т. д.) и команд, управляющих выводом этих изображений. Язык анализа результатов обеспечивает вывод результатов в графической и табличной форме.

**9. Взаимодействие имитационного приложения со смежными системами.** Имитационное приложение должно функционировать совместно с информационной системой управления предприятием (ИСУП). Использование статистики базы данных ИСУП в имитационной модели позволит существенно повысить адекватность модели. ИСУП, разрабатываемая заказчиком, обеспечивает средства автоматизации, учета и регистрации всех технологических операций (автоматических и ручных), проводимых в основных и вспомогательных цехах.

Возможны следующие варианты обмена данными с ИСУП:

- импорт графика планово-предупредительных работ;

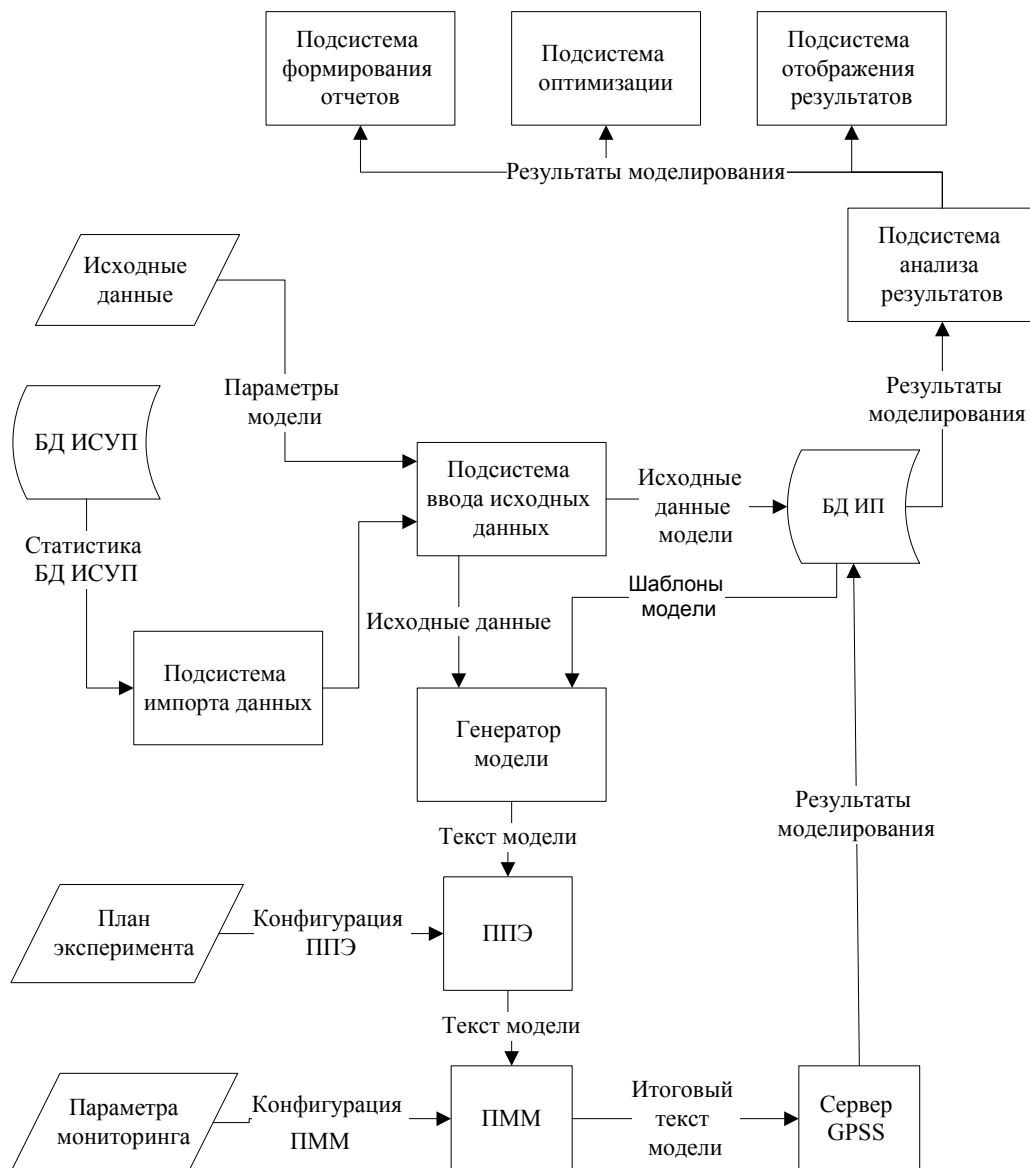


Рис. 2. Структура имитационного приложения

- импорт графика поставок сырья;
- импорт статистики поставок сырья для расчета вероятностей опоздания поставок и формирования функций распределения времени опоздания;
- импорт параметров оборудования;
- импорт плана отгрузки готовой продукции;
- импорт производственного плана;
- импорт статистики для формирования функций распределения времени выполнения различных этапов технологического процесса, моделируемых временной задержкой;
- импорт статистики для расчета вероятностей отказа оборудования.

**10. Структура имитационного приложения.** Разработанное имитационное приложение состоит из множества взаимосвязанных программных компонентов, позволяющих максимально автоматизировать и упростить проведение исследований. Структура приложения, подробно рассмотренная в [10], представлена на рис. 2.

Для упрощения процедуры развертки приложения и уменьшения финансовых затрат на покупку лицензий разработан GPSS-сервер, который позволяет установить пакет GPSS

World на единственный персональный компьютер. Имитационные приложения, устанавливаемые на пользовательские компьютеры, отправляют заявки на моделирование на сервер, который запускает процедуру моделирования и сохраняет результаты в базе данных имитационного приложения (БД ИП). Подсистема анализа результатов обращается к БД и предоставляет результаты для анализа.

**Заключение.** Разрабатываемая имитационная модель позволит повысить технико-экономические показатели производства и улучшить качество выпускаемых ферросплавов за счет:

- оценки влияния сроков, ритмичности и объемов поставок потребляемого предприятием сырья всех видов на плановые показатели;
- анализа загрузки производственных мощностей при различных управляющих и возмущающих воздействиях;
- проверки возможности выполнения производственной программы при выполнении тех или иных плановых ремонтно-восстановительных работ производственного оборудования;
- выбора допустимого уровня тех или иных возмущающих воздействий на основные производственные процессы;
- определения максимально возможного уровня выпуска продукции при существующей системе управления, технического оснащения и организации управления производственными процессами;
- выявления и устранения “узких мест” в организации технологических и производственных процессов.

Имитационное приложение будет внедряться на Аксуском заводе ферросплавов (филиал ТНК “Казхром”, Казахстан). В случае успешного внедрения планируется адаптация системы и внедрение ее на Донском горно-обогатительном комбинате (филиал ТНК “Казхром”, Казахстан).

## Список литературы

1. Власов С. А. Интегрированное проектирование металлургических комплексов / С. А. Власов, С. А. Малый, В. С. Томашевская, А. И. Тропкина. М.: Металлургия, 1983.
2. Смирнов В. С. Методы и модели управления проектами в металлургии / В. С. Смирнов, С. А. Власов, Е. С. Ваулинский, Б. И. Лебедев. М.: СИНТЕГ, 2001.
3. Власов С. А., Жагловская А. В. Повышение эффективности проектирования бизнес-процессов металлургических предприятий с использованием имитационного моделирования // Тр. 1-й Междунар. конф. “Системный анализ и информационные технологии”, Переславль, 12–16 сент. 2007 г. М.: Б. и., 2005. Т. 1.
4. Самойлов В. В., Власов С. А., Девятков В. В. Имитационное исследование системы сервисного обслуживания программно-технических средств ОАО “Татнефть” // Автоматизация в пром-сти. 2007. № 4. С. 11-14.
5. Усанов Д. И. Мониторинг имитационных моделей в среде GPSS World и анализ динамики параметров модели в процессе эксперимента // Всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности “Имитационное моделирование: теория и практика”. Сб. докл. Санкт-Петербург, 17–19 окт. 2007 г. СПб.: ФГУП ЦНИИТС, 2007. Т. 1. С. 310–314.
6. Усанов Д. И. Планирование эксперимента и оптимизация на основе нейросетевых метамоделей и генетических алгоритмов в среде GPSS World // Всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности “Имитационное моделирование: теория и практика”. Сб. докл. Санкт-Петербург, 21–23 окт. 2009 г. СПб.: ОАО “ЦТСС”, 2009. Т. 1. С. 197–200.
7. Афонин П. Система оптимизации на основе имитационного моделирования, генетического алгоритма и нейросетевых моделей // Proc. of the 13th Intern. conf. “Knowledge-Dialogue-Solution”, Varna (Bulgaria), 18–25 June 2007.

8. ROSSETTI M. D., HILL R. R., JOHANSSON B., ET AL. Sequential metamodelling with genetic programming and particle swarms // Proc. of the 2009 Winter simulation conf.

9. КОВАЛЕВ В. С., УСАНОВ Д. И., ЦУЦКОВ Д. В., КАЛИНИН С. В. Укрупненная модель железнодорожного направления // Всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности “Имитационное моделирование: теория и практика”: Сб. докл. СПб.: Б. и., 2007. Т. 2. С. 91–95.

10. УСАНОВ Д. И. Разработка имитационного приложения для анализа и оценки производственных мощностей Аксуского завода ферросплавов // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. “Проблемы перехода к устойчивому развитию монопрофильных городов”, Нижнекамск, 23 апр. 2010 г. Казань. Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. С. 180–183.

Усанов Дмитрий Игоревич — асп. Казанского государственного  
технического университета им. А. Н. Туполева;  
e-mail: dmitriusanov@gmail.com

Дата поступления — 12.05.10