

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА БАЗЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

*Статья посвящена разработке компьютерных тренажеров операторов технологических процессов, используемых для обучения студентов и оперативного персонала навыкам управления технологическими процессами металлургических предприятий. Рассмотрены основные требования к компьютерным тренажерам и пути разработки их математического обеспечения. Приведены примеры и преимущества использования тренажеров в учебном процессе.*

**Ключевые слова:** компьютерный тренажер оператора, имитационное моделирование, оператор технологического процесса.

**Актуальность задачи.** Интенсификация технологических процессов на предприятиях цветной металлургии неразрывно связана с решением целого ряда задач технического, социального и экономического характера. Развитие информационных технологий, повышение степени автоматизации и перераспределение функций между человеком и аппаратурой обострило проблему взаимодействия человека-оператора с системой управления. Стала создаваться ситуация, когда доля «человеческого фактора» в крупных мировых авариях стремительно росла вместе с повышением надежности электронной аппаратуры. Одной из причин такой тенденции является традиционный подход к построению сложных систем управления: ориентация на применение новейших технических (технологических) решений и недооценка необходимости построения эффективного «человеко-машинного» интерфейса (HMI – Human Machine Interface), ориентированного на пользователя (оператора/диспетчера) и его задачи [1].

Современный уровень производства, переход к распределенным системам управления выдвигает принципиально новые требования к подготовке операторов технологических процессов.

Сложность подготовки специалистов для предприятий цветной металлургии объясняется тем, что технологические процессы протекают, как правило, в высокотемпературных и химически агрессивных средах, имеют агрегаты большой единичной мощности и порой слабо оснащены системами автоматического контроля основных технологических параметров. Кроме того, обучение персонала на действующих технологических установках требует значительных капитальных затрат и

может привести к возникновению аварийных режимов работы и нестандартных технологических ситуаций.

Необходимо учитывать, что первоначально подготовка (в большей степени теоретическая) технологического персонала осуществляется в учебных заведениях. В результате обучение, повышение уровня подготовки и переподготовка специалистов металлургического профиля в рамках как вузовского, так и после вузовского образования находятся в сфере ответственности образовательного учреждения.

Общепризнано, что одним из наиболее эффективных подходов к обучению и совершенствованию подготовки специалистов практически всех отраслей промышленности является применение компьютерных тренажеров операторов (КТО) технологических процессов реального времени.

Основная задача таких тренажеров – формирование комплексного навыка принятия решений, который основывается на возможности смоделировать динамический отклик объекта и системы управления на произвольные управляющие воздействия оператора. Наличие компьютерного тренажера оператора позволяет оперативному и технологическому персоналу отрабатывать базовые навыки работы с системой управления и навыки действий в аварийных ситуациях без риска повлиять на ход реального технологического процесса. Полезность использования тренажеров в подготовке и переподготовке операторов сложных производств обоснована в [2, 3, 4]. Основой функционирования тренажеров являются имитационные математические модели. Такие модели строятся на основе знаний экспертов, представленных в виде таблиц и

---

\* - автор, с которым следует вести переписку.

графиков. Таким образом, применение высокоорганизованных АСУ не исключает, а скорее всего, предъявляет повышенные требования к квалификации персонала и отработке навыков оптимального управления технологическим процессом.

**Функции и состав КТО.** Первые тренажеры на базе ЭВМ создавались еще в 70-х годах XX века. По мере развития вычислительной и микропроцессорной техники, совершенствования систем управления технологическими процессами развивались и сами тренажеры, их функции и возможности. Из широкого многообразия компьютерных тренажеров можно выделить тренажеры для первичного обучения в рамках учебного заведения и тренажеры для подготовки, повышения квалификации и аттестации операторов технологических процессов. Во втором случае речь идет о создании полномасштабных тренажеров силами компаний, имеющих опыт моделирования совершенствования систем управления и оптимального управления. Подобный продукт является весьма дорогостоящим и учебным заведениям становится «не по карману». Отличия наблюдаются даже в составе компьютерного тренажера оператора (КТО) технологического процесса.

*Рабочее место оператора на действующем производстве* обычно состоит из терминала, с помощью которого оператор получает информацию о ходе процесса, а также клавиатуры и мыши, посредством которых оператор передает системе информацию о своих решениях. Также могут использоваться специализированные (промышленные) варианты клавиатуры и манипуляторов, отличающиеся по форме и свойствам от стандартных, используемых для персональных компьютеров.

Очевидно, что и при обучении оператора целесообразно использовать именно те устройства, которые будут использоваться в его дальнейшей профессиональной деятельности.

*Компьютерные тренажеры, используемые в учебном процессе* подготовки специалистов, реализованы на базе персонального компьютера:

- системный блок используется для хранения математического и программного обеспечения исследуемого процесса,
- монитор – для отображения информации о процессе,

- мышь (клавиатура) – для управления тренажером (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема КТО.

Технологический процесс и устройства, задействованные в компьютерном тренажере, обычно представлены на терминале оператора в виде символов, которые можно разделить на основные классы (клапан, мотор, насос, ПИД-контроллер и т. п.). Каждый символ несет определенную смысловую нагрузку и обладает набором функций, связанных с ним. Например, символы устройств, как правило, имеют функции включения или выключения устройства, перевод устройства в автоматический режим управления и т. п.

Обучаемый должен усвоить эту символику, а также получить и закрепить навыки использования всех основных функций символа каждого типа.

С точки зрения оператора технологический процесс представляется множеством компонентов (узлов, аппаратов, агрегатов, емкостей и т. п.), каждый из которых представлен на дисплее в виде измерений и показателей состояния. Различные наборы значений измерений и показателей состояния соответствуют различным состояниям технологического процесса.

В обоих указанных вариантах компьютерный тренажер оператора технологических процессов в большинстве случаев может быть реализован на базе персонального компьютера офисного исполнения и рассматривается как компьютерная обучающая система.

- Задачи компьютерной обучающей системы – привить студентам следующие навыки:
- умение анализировать ситуацию и определить порядок действий, который приведет к

заданной цели (перевод технологического процесса в новый режим работы, ликвидация нештатных ситуаций и т. д.);

– умение на каждом шаге своих действий критически осмысливать полученные результаты и определять правильность выбранных методов решения, основываясь на ранее полученных знаниях.

**Режимы работы тренажера.** КТО, применяемые для обучения студентов (операторов-технологов) металлургического направления, строятся на базе персональных компьютеров. Тренажер имеет интуитивно понятный дружественный интерфейс. На экране монитора представлено головное меню, позволяющее обучаемому выбрать тип изучаемого или управляемого процесса и один из возможных режимов работы компьютерного тренажера: обучения, контроля знаний, «советчика».

*Режим обучения* заключается в исследовании процесса и обучении специалистов на виртуальной модели объекта или процесса в реальном/ускоренном масштабе времени в диалоговом режиме. При этом на «пульте оператора» выводятся подсказки и рекомендации оператору, а после окончания сеанса обучения производится анализ допущенных ошибок.

*Режим контроля знаний* используется при контроле знаний мастеров и технологов и сдаче квалификационных экзаменов техническим персоналом металлургических предприятий на разряд.

В отличие от режима обучения, в этом режиме ошибки, допущенные студентом или мастером, накапливаются в памяти ЭВМ и выводятся на экран только по окончании сеанса обучения.

После сеанса на экране дисплея показывается суммарная оценка, характеризующая эффективность усвоения изученного студентом материала или приобретения навыков по управлению процессом оперативным персоналом металлургических цехов.

*Режим «советчика»* используется для коррекции хода реального процесса посредством пульта оператора и локальных систем

автоматического регулирования технологических параметров.

Для осуществления такой коррекции обучаемый (оператор) должен с помощью КТО исследовать различные режимы, позволяющие исключить возникшие отклонения от технологического регламента и выбрать такие, которые в данной производственной ситуации могут принести наибольший эффект, т. е. вывести процесс на заданный оптимальный режим работы. Коррекция осуществляется на основе полученной от ЭВМ информации о реальном технологическом процессе. При этом рекомендации могут быть получены двумя способами. В первом случае ЭВМ по заранее заданной программе рассчитывает необходимое управляющее воздействие (или комплекс воздействий), исходя, например, из условий оптимальности, а оператор принимает решение об его использовании. Во втором случае управляющее воздействие определяется самостоятельно мастером на основании исследования различных режимов функционирования системы [5].

**Требования к тренажерам.** Для реализации вышеперечисленных функций компьютерный тренажер оператора должен отвечать следующим требованиям:

- наглядности;
- информативности;
- многофункциональности.

*Наглядность* предполагает, что на экран монитора должна быть выведена мнемосхема исследуемого процесса или агрегата с имитацией основной пускорегулирующей и контрольно-измерительной аппаратуры, применяемой для управления данным процессом или агрегатом (рис. 2).

*Информативность* предполагает вывод на экран монитора графика изменения регулируемого параметра (рис. 3) и значений основных входных и управляющих параметров (рис. 4). Например, на рис. 4 представлен пример окна тревог процесса бактериального окисления сульфидных золотосодержащих руд, где отображены отклонения значений технологических параметров от нормы.

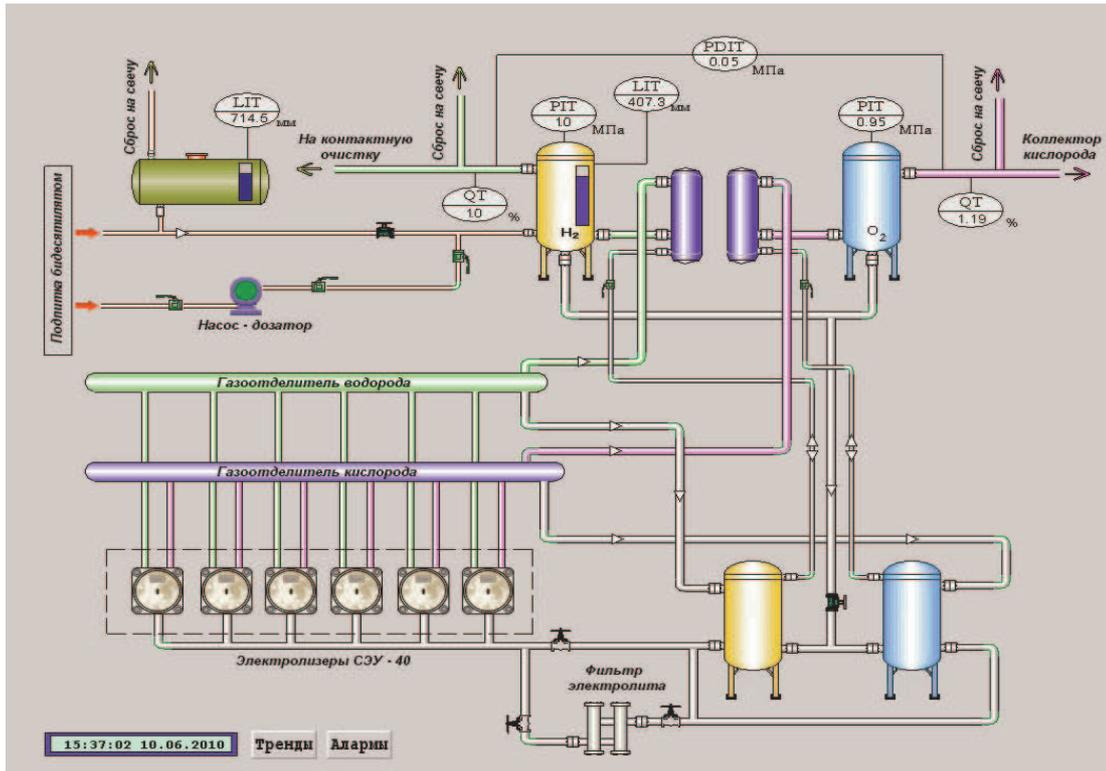


Рис. 2. Мнемосхема процесса производства водорода.

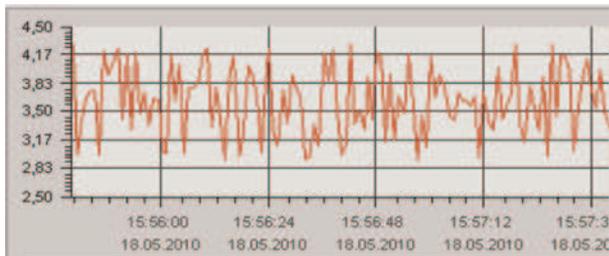


Рис. 3. Окно трендов.

Time / Date	Description	Tag	Value
9:44:10 21.05.2010	Содержание выше нормы	/+ Кислород	4.1
9:44:48 21.05.2010	Содержание в норме	/ Кислород	3.7
9:45:18 21.05.2010	Значение выше нормы	/+ рН	1.62
9:45:48 21.05.2010	Значение в норме	/ рН	1.56
9:46:18 21.05.2010	Содержание в норме	/ Кислород	2.9
9:46:48 21.05.2010	Значение в норме	/ Температ	38.8
9:47:18 21.05.2010	Значение в норме	/ ОВП	780
9:47:48 21.05.2010	Значение в норме	/ Плотность	1.2
9:48:18 21.05.2010	Значение в норме	/Расход	120

Рис. 4. Окно тревог.

Многофункциональность включает:

- выбор одного из возможных режимов работы и управляемого параметра;
- ускорение масштаба времени, который целесообразно использовать для процессов, имеющих большую (десятки, минуты, часы) постоянную времени, для непрерывных во времени и циклических процессов;
- введение временных задержек;

- использование управления с прогнозом;
- имитацию случайных возмущений;
- сигнализацию аварийных режимов и нештатных ситуаций;
- имитацию процесса отбора и анализа проб (при необходимости) и др.

**Математическое обеспечение КТО.** Основу функционирования компьютерного тренажера составляют имитационные математические модели исследуемого процесса и алгоритм функционирования тренажера. Имитационные системы управления основаны на принципах теории обучения распознаванию образов и призваны «научить» машину имитировать действия лучших специалистов.

Основная сложность при реализации КТ состоит в разработке математического (МО) и программного обеспечения (ПО). Это связано с широким разнообразием физико-химических превращений, протекающих в различных металлургических агрегатах и технологических процессах. В результате становится невозможным создание универсального МО для металлургических объектов и, как правило, необходимо разрабатывать прикладные МО и ПО, предназначенные для решения конкретных технических задач [3, 6].

Математическое моделирование для исследования характеристик процесса функцио-

нирования систем можно разделить на аналитическое, имитационное и комбинированное.

Для *аналитического моделирования* характерно то, что процесс функционирования элементов системы (физико-химические превращения, загрузка, выпуск, тепло- и массообмен) описывается в виде некоторых функциональных соотношений (алгебраических, дифференциальных, конечно-разностных) или логических условий.

Задача *имитационного управления* решается как задача построения математической модели объекта управления на основании передового опыта оператора с последующим использованием этой модели в системе управления. При *имитационном моделировании* имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени. Основным преимуществом имитационного моделирования перед аналитическим является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют относительно просто учитывать следующие факторы: наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия.

Существует ряд методов создания таких моделей, которые базируются на:

- методах на основе физико-химических превращений, материальных и тепловых балансов;
- экспериментально-статистических методах;
- теории искусственных нейронных сетей.

На базе анализа основных *физико-химических превращений*, характеризующих конкретный технологический процесс, создаются динамические модели. Этот путь применяется, когда физические законы известны априори, и математические модели строятся на базе теоретического подхода, что дает возможность вскрыть существенные количественные и качественные закономерности процесса. Такая модель может быть использована не только для решения задачи управления, но также для оптимального проектирования технологического процесса, агрегата и системы управления процессом.

Использование моделей на основе *материальных и тепловых балансов* возможно при планировании производства, при разработке технологических регламентов и технико-экономических обоснований проектов.

*Метод статистических испытаний* имеет наибольший эффект его применения при исследовании сложных систем, на функционирование которых существенное влияние оказывают случайные факторы.

В случаях недостаточной информации о процессе и сложности получающегося при теоретическом подходе математического описания при решении задачи оперативного управления целесообразнее использовать простые в структурном отношении модели, составленные на базе формальных математических выражений (полиномов), построение которых основано на экспериментально-статических методах исследования объекта и обработки данных наблюдений. Необходимыми этапами построения полиномиальной модели являются: сбор данных о нормальном функционировании объекта, описание, статистический анализ и предварительная обработка данных, оценка структуры и параметров модели. Для построения модели такого рода используется регрессионный анализ, при котором прямым методом измеряются параметры процесса и рассчитываются статистические характеристики параметров.

Теория *искусственных нейронных сетей* относится к современным технологиям моделирования и управления. В основу этой теории положено понятие нейрона – биологической клетки, которая обрабатывает информацию. Искусственный нейрон является моделью нейрона.

Математическая модель нейрона описывается соотношением

$$s = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0, y = f(s),$$

т. е. сигналы  $x_i$ , поступающие на вход нейрона, умножаются на весовые коэффициенты  $w_i$  (синаптические веса, характеризующие силу связи между нейронами). Далее они суммируются, и результирующий сигнал, сдвинутый на величину смещения  $w_0$ , подается на вход блока, реализующего активационную функцию нейрона.

Искусственные нейроны, связанные между собой синаптическими соединениями, представляют собой искусственную нейронную сеть (НС).

Искусственные НС способны к обучению. Под обучением понимают целенаправленный процесс настройки архитектуры сети и изменения значений весов межслойных синаптических связей, итеративно повторяемый до тех пор, пока сеть не приобретет необходимые свойства. Наиболее популярным из алго-

ритмов обучения является алгоритм обратного распространения ошибки (Error back propagation). При обучении сети ей предъявляется эталонный образ и верный ответ, которые представлены в виде статистических данных. В процессе обучения алгоритм вычисляет поправки к весам сети. Обучение заканчивается при достижении заданной ошибки. После операции обучения сеть готова к работе, например, предсказанию выходного вектора по входным статистическим данным, которых она не видела.

Качество обучения НС напрямую зависит от количества элементов входных векторов, а также от того, насколько полно эти векторы описывают данную задачу.

Искусственные нейронные сети – хороший инструмент для решения задач моделирования, имеющий большую точность и адекватность, но только в тех случаях, когда имеется большое количество экспериментальных данных, снятых за сравнительно небольшой промежуток времени.

Независимо от принятого метода моделирования целесообразно использовать математические модели различной сложности на разных этапах обучения, от студента до оператора реального технологического процесса. При разработке прикладных МО и ПО необходимо учитывать следующие основные факторы:

- математическая модель исследуемого процесса должна работать в диалоговом режиме и позволять вводить в нее по ходу процесса необходимые управляющие воздействия, используемые при управлении реальным процессом или агрегатом, а также учитывать постоянную времени объекта;

- в математическую модель необходимо включать только те параметры, которые доступны непрерывному автоматическому контролю на данном объекте;

- реакция математической модели и тренажера в целом на управляющие воздействия должна быть идентична реакции реального объекта на аналогичное возмущение;

- при создании прикладных МО и ПО необходимо предусмотреть прогноз изменения управляемого параметра во времени;

- при построении математических моделей следует учитывать возможность получения дополнительной информации об изменении основных параметров с использованием методов математической статистики и непараметрического моделирования;

- модель должна быть открытой, предусматривать возможность введения в нее дополнительной информации и управления в реальном масштабе времени и ускоренном режиме;

- алгоритм функционирования тренажера должен быть гибким, допускающим использование его для решения многофункциональных задач, допускать многократные повторения однотипных управляющих процедур и осуществлять анализ полученных результатов управления.

**Примеры компьютерных тренажеров операторов технологических процессов.** С учетом рассмотренных выше функций и требований разработаны модели и алгоритмы, положенные в основу компьютерных тренажеров для обучения плавильщиков руднотермических печей (рис. 5) и операторов процесса конвертирования медных штейнов (рис. 6), позволяющие отрабатывать различные ситуации, возникающие на реальном технологическом оборудовании.

Компьютерные тренажеры отвечают требованиям наглядности, многофункциональности, информативности и эргономики [7, 8].

Для реализации автоматизированных КТО разработаны: структура компьютерной системы, математическое и программное обеспечение с учетом опыта функционирования промышленного оборудования и требований, предъявляемых технологической инструкцией к технологическому персоналу. Математические модели исследуемых процессов работают в диалоговом режиме, допускающем ввод в них по ходу процесса необходимых управляющих воздействий, используемых при управлении реальными процессами.

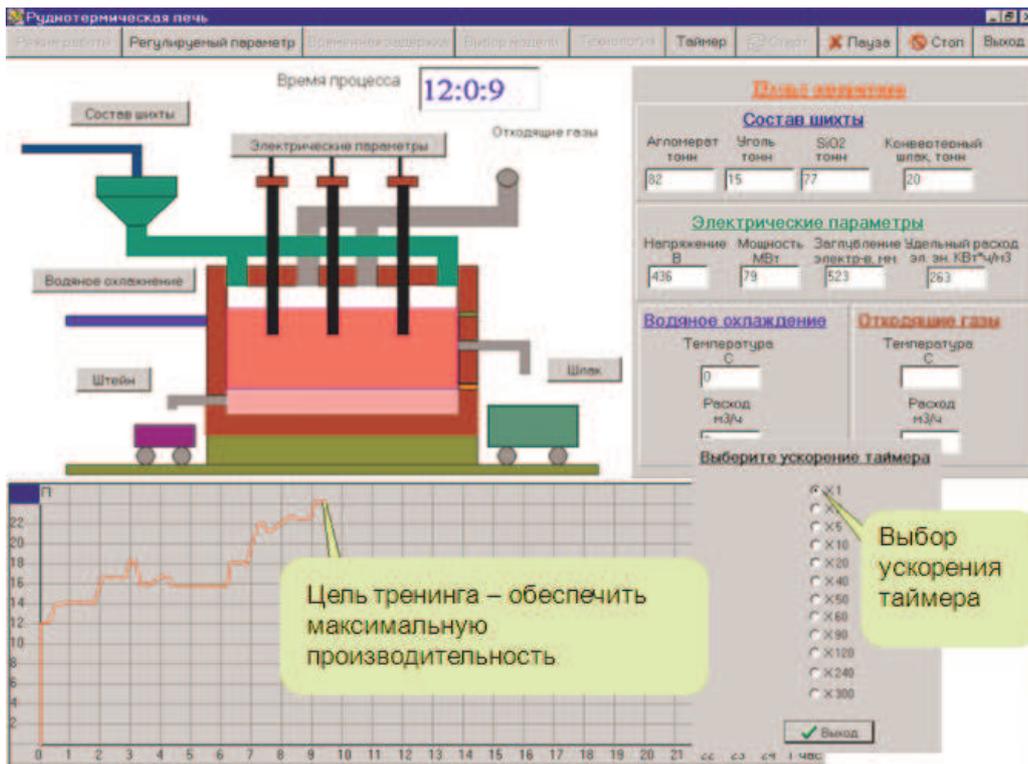


Рис. 5. Мнемосхема процесса плавки в РТП.

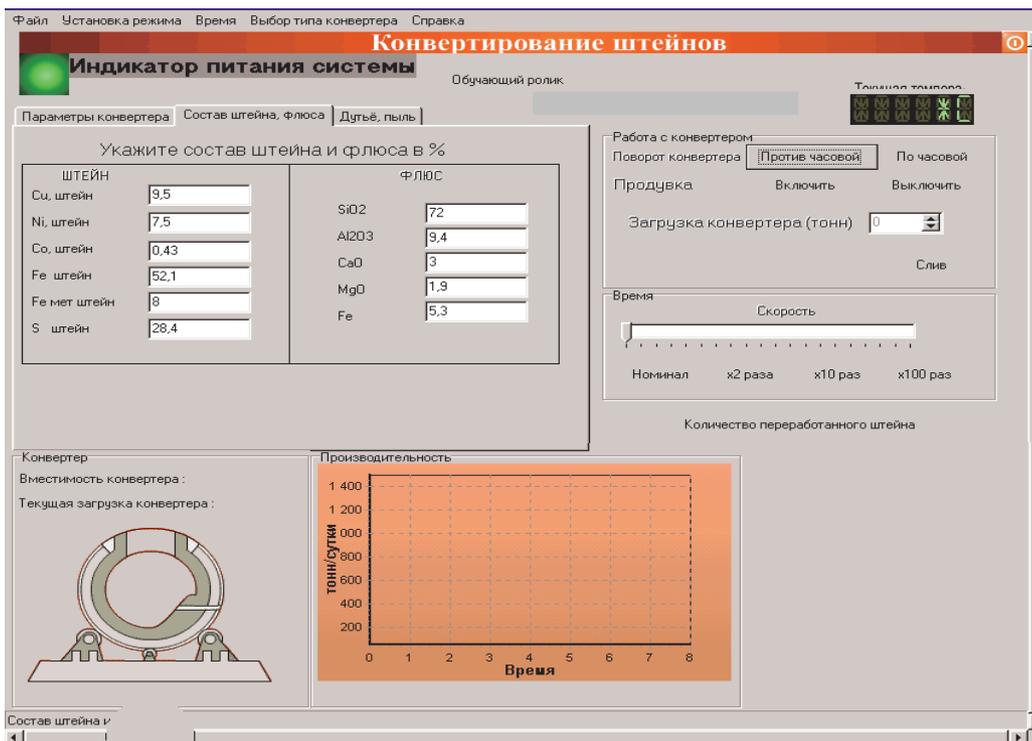


Рис. 6. Мнемосхема процесса конвертирования медных штейнов.

Требование информативности обеспечивается тем, что на монитор выводится график регулируемого параметра и значения основных входных и управляющих параметров,

оказывающих существенное влияние на эффективность функционирования объекта.

На экран монитора выведены мнемосхемы исследуемых процессов, где представлены схема объекта управления и щит (пульт) опе-

ратора. В качестве управляющих воздействий выбраны параметры, применяемые на промышленных объектах, например, ввод электрической мощности, количество и химический состав загружаемой шихты для плавки в РТП.

В случае неполадок и неправильного ведения процесса, например засорения фурм штейном из-за неверной очередности действий обучаемого, программой выдаются соответствующие сообщения.

Компьютерные тренажеры позволяют имитировать и регулировать порядок действий, для этого на пульте оператора выведена основная пускорегулирующая и контрольно-измерительная аппаратура основных технологических параметров.

Многофункциональность КТО реализована режимом ускорения времени.

Разработанные компьютерные системы могут работать в режиме обучения, в котором студент/оператор, исходя из имеющегося опыта, самостоятельно выбирает управляющие воздействия, а также в режиме управления, при котором расчет управляющих воздействий производится автоматически с учетом прогноза изменения основных технологических параметров, что является весьма перспективным при управлении сложными металлургическими процессами.

В режиме обучения в формате лабораторных занятий студент, имитируя набор реальных управляющих воздействий, управляет процессом по оптимизации или стабилизации одного из выходных параметров, например, температуры, производительности или удельного расхода электроэнергии. Процесс обучения считается законченным, когда оператор-технолог научился выводить процесс на заданный режим практически из любого исходного состояния в области допустимых значений за определенное время [9].

Использование компьютерного тренажера позволяет студенту/оператору в диалоговом режиме выбрать управляющие воздействия и проанализировать их влияние на выходные показатели, т. е. проверить на модели эффективность различных способов интенсификации производства.

**Заключение.** При разработке рассмотренных автоматизированных информационно-советующих систем наибольшие трудности имели место на этапе приобретения соответствующих знаний от эксперта. Полученные знания о технологическом процессе,

необходимые для работы экспертной системы, определенным образом формализованы и представлены в памяти ЭВМ в виде базы знаний, которая может изменяться и дополняться в процессе развития системы. В результате, система может обладать знаниями, позволяющими выполнить диагностику и планирование ведения технологического процесса. При этом решается главная задача разработанных систем – определение способностей обучаемого по основным направлениям курса и повышение уровня подготовки специалистов.

Преимущества подготовки специалистов на базе КТО:

- компьютерные тренажеры могут размещаться в компьютерных классах учебных заведений и учебных центрах предприятий, благодаря чему достигается массовость занятий;

- тренажерные модели основного технологического оборудования и процессов предприятий цветной металлургии могут быть достаточно простыми и недорогими;

- занятия на КТО благополучно вписываются в учебный процесс и эффективно сочетаются с теоретическим курсом, лабораторными работами и самостоятельной работой студентов;

- значительно улучшается качество обучения за счет наглядности обучения и имитации реальных технологических ситуаций и режимов;

- уменьшаются капитальные затраты на обучение.

Благодаря КТ студенты металлургического направления подготовки быстрее знакомятся с технологией, оборудованием и системой управления процессом (агрегатом), качественнее осваивают стандартные процедуры (пуск, останов, нештатные ситуации и др.), а также получают навыки действий в сложных, предаварийных и аварийных ситуациях. КТО позволяют отрабатывать каждое управление неограниченное число раз в реальном и ускоренном масштабе времени, что особенно актуально для медленно протекающих металлургических процессов в агрегатах большой единичной мощности. В результате студенты уже с 2-3 курсов начинают глубже понимать физико-химические явления изучаемого процесса, у них быстрее формируется представление о совокупности технологических параметров в нормальном и нештатном режимах работы, они быстрее учатся отрабатывать действия в предаварийных и аварийных си-

туациях, а также вырабатывать правильную стратегию действий.

Однако следует помнить, что эффективность обучения будет тем выше, чем выше сходство тренажерного комплекса и реальной АСУ ТП.

Качественный тренажер будет незаменим не только для периодического тренинга действующих операторов технологических процессов, но и при решении инженерных и технологических задач. На таких КТО без существенных материальных затрат можно отрабатывать различные схемы управления и режимы ведения технологических процессов.

Создание «хорошего» КТО предусматривает этап доводки и настройки модели, который может быть осуществлен только в теснейшем сотрудничестве заводских специалистов по автоматизации с разработчиком тренажера. Но, несмотря на высокую стоимость разработки, предприятия, использующие КТО, несомненно повысят свой рейтинг (конкурентоспособность) и получат экономический выигрыш за счет снижения экономических потерь, возникающих из-за ошибок оперативного технологического персонала.

### *Литература*

1. Андреев Е.Б., Попадько В.Е. Программные средства систем управления технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности: М.: Нефть и газ; РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. 268 с.

2. Гурдзибева, А.Р. Исследование и разработка методов и алгоритмов имитационного

моделирования для тренажеров операторов сложных объектов: дис. ... канд. техн. наук. Владикавказ, 2004. 188 с.

3. Танеев В.В. Применение математических моделей для прогнозирования аварийных ситуаций в АСУ ТП // Математические модели в АСУ ТП: сб. науч. тр. М., 1984. С. 33-35.

4. Лысков Ф.Д. Педагогические основы создания и применения тренажеров: Метод, рекомендации. М.: Высш. школа, 1979. 24 с.

5. Горенский Б.М. Автоматизированные системы имитационного управления объектами цветной металлургии: монография. Красноярск: Изд-во ГАЦМиЗ, 2002. 152 с.

6. Курносоев Б.В. Имитационная система управления технологическим процессом спекания нефелино-известняковой шихты: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2004. 146 с.

7. Даныкина Г. Б. Компьютерный тренажер процесса конвертирования медных штейнов // Вестн. КрасГАУ / Краснояр. гос. аэрокосмич. ун-т. 2006. № 12. С. 46-50.

8. Горенский Б.М., Казинникова В.А., Халикова О.Е. Использование компьютерного тренажера для оптимизации технологического процесса плавки в РТП // Оптимизация режимов работы систем электроприводов: сб. науч. тр. КГТУ. Красноярск, 1999. С. 22-26.

9. Горенский Б.М., Даныкина Г.Б., Кирякова О.В. Новые информационные технологии в управлении металлургическими процессами: 2-е изд., испр. и доп. Красноярск: Ун-т цвет. металлов и золота, 2006. 116 с.